



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# KONCEPČNÍ NÁVRH TESTERU POLYMERNÍHO OZUBENÍ VE VAKUU

CONCEPTUAL DESIGN OF A POLYMERIC GEAR TESTER IN VACUUM

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matyáš Ptáček

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mikuláš Černohlávek

BRNO 2022



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Matyáš Ptáček**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Mikuláš Černošník**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Koncepční návrh testeru polymerního ozubení ve vakuu

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ozubená kola satelitů na nízké oběžné dráze musí pracovat bezporuchově po dobu delší než 10 let v nepříznivém prostředí vakua a dalších kosmických vlivů. Všechny volby materiálů a maziv ozubených kol se musí před startem otestovat na zemi v relevantních podmínkách a ověřit, jestli je předpokládané chování pravdivé.

Typ práce: vývojová – konstrukční

#### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je koncepčně navrhnout zařízení pro testování ozubených kol v relevantních podmínkách (vakuum).

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled testovacích zařízení používaných pro testování ozubených kol,
- tvorba konceptů testovacího zařízení,
- volba finálního konceptu a zdůvodnění,
- zpracování 3D modelů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, CH.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

PURSCHKE, R., a A HOEHN. Evaluation and test of different gear concepts for Ka-band Antenna Pointing Mechanisms. In: 2014 IEEE Aerospace Conference. B.m.: IEEE, 2014, s. 1–8,. ISBN 978-1-4779-1622-1.

PURSCHKE, R., HOEHN A. a WALTER A. Application of synthetic gear wheels to space mechanisms. In: 2015 IEEE Aerospace Conference. B.m.: IEEE, 2015, s. 1–12. ISBN 978-1-4779-5379-0

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá koncepčním návrhem testeru polymerního ozubení schopného pracovat ve vakuu. Pomocí testovacího zařízení je umožněno testovat součinitel tření v ozubeném soukolí. V úvodní části práci je popsána problematika provozních podmínek satelitů na nízké oběžné dráze společně s vlivy, které na ně působí. Následně jsou vybrány vhodné polymerní materiály a popsány současné veřejně dostupné testovací zařízení. Na základě rešerše jsou zhotoveny dva koncepční návrhy, jeden z nich je vybrán a detailně popsán v závěru práce.

## KLÍČOVÁ SLOVA

ozubení, satelit, polymerní materiály, součinitel tření, testovací zařízení

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the conceptual design of a polymeric gear tester in vacuum. Using a test device, it is possible to test the coefficient of friction in gears. At the beginning of the work is described the issue of operating conditions of satellites in low orbit together with the effects that affect them. Subsequently, suitable polymeric materials are selected, and current publicly available test rigs are described. Based on the research, two conceptual designs are made, one of them is selected and described in detail at the end of the work.

## KEYWORDS

gear train, satellite, polymer material, coefficient of friction, test rig



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PTÁČEK, Matyáš. Koncepční návrh testeru polymerního ozubení ve vakuu. Brno, 2022, 51 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140085>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Mikuláš Černošlávka.



## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Mikuláši Černohlávkovi za cenné rady, čas a připomínky při vedení této práce. Dále bych pak chtěl poděkovat svým rodičům, jenž mě v průběhu celého studia podporovali.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Mikuláše Černohlávka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Provozní podmínky satelitů na nízké oběžné dráze	14
2.1.1	Termální vlivy	15
2.1.2	Vakuum	15
2.1.3	Radiace	16
2.2	Přehled vhodných polymerních materiálů	16
2.2.1	Poly-ether-ether-ketonová vlákna (PEEK)	16
2.2.2	DuPont™ Vespel® polyimide	17
2.3	Přehled relevantních metod měření součinitele tření	18
2.3.1	Měření pomocí tenzometrů (strain gauges)	18
2.3.2	Měření pomocí metody MKP	19
2.4	Přehled relevantních testovacích zařízení ozubených kol	21
2.4.1	Tester vyvinutý Mnichovskou univerzitou pro testování materiálu PEEK [5]	21
2.4.2	Tester vyvinutý Mnichovskou univerzitou pro testování boční vůle [7]	24
2.4.3	Tester vyvinutý pro analýzu únavového porušení – pittingu [11]	26
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>28</b>
3.1	Analýza problému	28
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	29
3.2.1	Cíl práce	31
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>32</b>
4.1	Koncepční návrh č. 1	32
4.2	Koncepční návrh č. 2	33
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>35</b>
5.1	Finální koncepční řešení	35
5.1.1	Pohonná soustava	36
5.1.2	Metoda měření	38
5.1.3	Pastorek	38
5.1.4	Spoluzabírající ozubené kolo	40
5.1.5	Lineární vedení	42
5.1.6	Cenový odhad	43
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>44</b>

<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>45</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>46</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>48</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>49</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>50</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>51</b>
12.1	Cenový odhad	51

# 1 ÚVOD

Na nízkou oběžnou dráhu jsou vysílány různé druhy zařízení, které nám ulehčují každodenní život. Tato zařízení však mají danou životnost, kterou je potřeba prodloužit. Jedním z aspektů, které ji ovlivňují, jsou ozubená kola. Ozubení těchto zařízení musí bezporuchově pracovat po dobu delší než 10 let, a to v extrémních vesmírných podmínkách.

Je známo, že životnost ozubení zkracuje zejména nedostatek maziva, který časem způsobuje zvýšené opotřebení, nebo až ztrátu přenosu energie mezi jednotlivými ozubenými koly. Tento problém motivuje k vývoji materiálů, které nebudou vyžadovat přítomnost maziv, a i přes jejich absenci si zachovají svoji funkčnost. Nepřítomnost maziv znamená mnoho dalších výhod, jako je třeba odlehčení celé konstrukce, jelikož není potřeba rezervoáru. Nedochozí zde ke kondenzaci maziva, tudíž nemusíme zohledňovat následnou reakci s ostatními použitými materiály. Mezi vhodné materiály mající potenciál samomaznosti patří polymerní materiály. Obecně jsou tyto materiály velmi lehké oproti jiným kovovým slitinám, čímž dochází k úspoře místa i hmotnosti v nákladovém prostoru nosiče. Polymery také nekorodují a určité sloučeniny disponují i vysokou pevností a jsou schopny pohltit nechtěné vibrace. Všechny tyto vlastnosti jsou však teoretické a nelze je vyslat do vesmíru bez otestování v relevantních podmínkách na Zemi. Je nutné ověřit, zda předpokládané chování je pravdivé, a zároveň se vyvarovat možným problémům, které by bez tohoto testování mohly vzniknout.

Tato práce se zabývá koncepčním návrhem testeru polymerního ozubení. Pracovní podmínky tohoto testu jsou redukovány na vakuum ( $10^{-8}Pa$ ). Cílem testeru je měření součinitele tření v ozubeném soukolí.

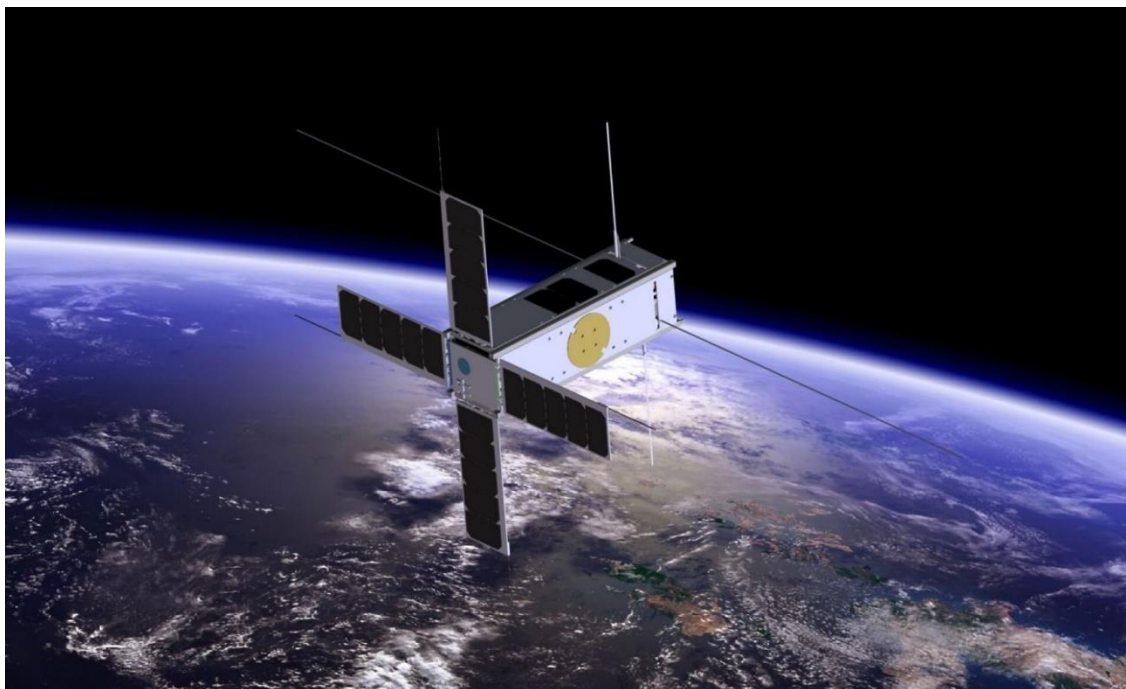
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Provozní podmínky satelitů na nízké oběžné dráze

Popis prostředí a chování satelitů na nízké oběžné dráze není lehkým úkolem. Vesmírné prostředí se chová velmi dynamicky a je ovlivněno několika významnými aspekty. Kvůli těmto aspektům je nutno klást velký důraz na otestování jednotlivých součástí ještě před vzletem.

Satelity obíhají Zemi ve výšce mezi 100 km až 1000 km, avšak na oběžných drahách nižších než 600 km na družice stále působí částice uniklých plynů, které je zpomalují. Kvůli vzniklé odporové síle, která působí na objekty, je nutné, aby tyto satelity měly vlastní pohon. Bez vlastního pohonu tak objekty pohybující se po této orbitě postupem času zanikají v atmosféře. Z tohoto vyplývá, že pokud je nutné dosáhnout vyšší životnosti daného satelitu, musíme mu zajistit vlastní pohon, který mu bude dodávat energii. Jelikož víme, že odporová síla s přibývajícím výškou rapidně klesá, je dalším řešením vyslání satelitu na vyšší oběžnou dráhu. [1]

Hlavními ovlivňujícími faktory jsou termální vlivy, vakuum a radiace. Ty budou dále rozebrány podrobněji.



Obr. 2-1 Satelit PICASSO CubeSat [18]

## 2.1.1 Termální vlivy

Mezi faktory vesmírného prostředí patří různé typy záření, které ovlivňují tepelné podmínky satelitů. Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena na satelity vyslané na nízkou oběžnou dráhu Země, jsou brány v potaz pouze určité typy termálních vlivů. Díky Van Allenovým radiačním pásům jsme schopni do termální analýzy zohlednit pouze přímou radiaci od Slunce, albedo radiaci a infračervené záření od planety Země.

Při termálních analýzách se často práce rozděluje na tzv. „Hot case“, kdy satelit vstřebává největší množství tepla, tedy teploty na satelitu dosahují svých maximálních hodnot. Druhá část analýzy se věnuje tzv. „Cold case“. Již z názvu lze usoudit, že se jedná o přesný opak prvního případu. Obecně nelze přesně definovat interval teplot, jelikož se teploty jednotlivých komponentů satelitu mohou výrazně lišit. (viz Tab. 2-1)

Tab. 2-1 Teplotní rozhraní vybraných částí satelitu

Komponenta	Hot Case [°C]	Cold case [°C]
Raspberry Pi	10,1900	-15,1088
Magnetometr	2,0414	-20,0721
Solární panel	42,64	-26,51
Akumulátor	4,3116	-21,2049
GPS anténa	-1,7652	-9,2202

Termální analýza satelitu je velmi důležitá pro zohlednění následného chování materiálů využívaných právě při výrobě ozubených kol. V našem případě tedy pro výrobu polymerních ozubených kol. [2]

## 2.1.2 Vakuum

Nejpodstatnějším faktorem je vakuum. Tlak na nízké oběžné dráze dosahuje hodnot  $10^{-9}$  až  $10^{-11}$  torr, tedy  $\sim 10^{-8}$  až  $10^{-10}$  Pa. [3] Uvnitř satelitů pak  $\sim 10^{-5}$  až  $10^{-6}$  Pa. Kvůli nepřítomnosti atmosférického tlaku dochází k odpařování [outgassing]. [4] Odpařování je velmi podstatné zejména u polymerních materiálů, které jsou tvořeny různými aditivami. Při procesu odpařování tak polymerní materiály ztrácí značnou část své hmotnosti, dochází ke změně materiálových vlastností samotných polymerů, což může vést i ke ztrátě funkčnosti dané součásti. Problémem je, že odpařování může ovlivnit i funkčnost dalších součástí satelitu, může dojít ke kontaminaci zrcadel nebo dalších opticky využívaných povrchů. [5]

### 2.1.3 Radiace

Teplotu satelitu nejvíce ovlivňují dva typy radiace. Těmi jsou záření od Slunce a Albedo radiace. Pro výpočet zářivého toku způsobeného přímou radiací od Slunce zohledňujeme tři proměnné. Absorptanci, úhlový součinitel a solární konstantu. Solární konstanta a úhlový součinitel jsou závislé na poloze Země vůči Slunci, jelikož Země obíhá Slunce po elipse. Absorptance je ovlivněna použitým materiálem. Druhým typem je Albedo záření. Albedo je míra odrazivosti povrchu. Jedná se o poměr odraženého krátkovlnného záření ku množství dopadajícímu záření. Opět závisí na pozici Země vůči Slunci, ale také i na pozici satelitu vůči Zemi (lesy, půda, voda dosahují jiných hodnot odrazivosti) nebo i na počasí. [2]

## 2.2 Přehled vhodných polymerních materiálů

Využití polymerních materiálů při vesmírných misích přináší mnoho pozitiv. Jednou z výhod je značně nižší hmotnost oproti běžně využívaným kovovým slitinám. K dalšímu snížení hmotnosti může dojít díky absenci maziva, tudíž i absenci rezervoáru. Díky tomuto se může i značně zvýšit životnost (maziva mohou být právě faktorem snižujícím celkovou životnost součástí). Mezi další podstatné vlastnosti patří i technologický postup výroby (např. 3D tisk metodou SLS – vysoká pevnost a přesnost) a velmi vysoká korozivzdornost.

### 2.2.1 Poly-ether-ether-ketonová vlákna (PEEK)

Poly-ether-ether-ketonová (PEEK) vlákna byla vyvinuta pro aplikace v náročných podmínkách. PEEK komposity se vyjímají svými velmi dobrými materiálovými vlastnostmi. Jsou dlouhodobě odolné vůči vysokým teplotám dosahujícím až 250 °C. Poly-ether-ether-ketonová vlákna mají vysokou pevnost a také dobrou odolnost vůči opotřebení. Pro vesmírné aplikace je důležité i to, že splňují podmínky dané vesmírnými agenturami a dosahují nízkých hodnot odpařování. Avšak nejpodstatnějším faktorem tohoto polymerního materiálu je možnost použití bez nutnosti mazání. Nevýhodou PEEK polymeru je vyšší citlivost vůči UV záření.

Mechanické vlastnosti lze pak zlepšit pomocí různých aditiv, jako jsou karbonová vlákna, PTFE nebo grafit. [5]

Tab. 2-2 Materiálové charakteristiky Victrex PEEK 450G [6]

Materiálové charakteristiky	Jednotky	Hodnoty
Hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,3
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	98
Tvrдость	HV (Vickers)	26,1-28,5
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	45
TML	[%]	0,26

### 2.2.2 DuPont™ Vespel® polyimide

Mezi další vhodné polymerní materiály lze zařadit řadu polyimidových vláken DuPont™ Vespel®. Tyto polymerní kompozity taktéž disponují výbornými materiálovými vlastnostmi. Dlouhodobě zvládají pracovat ve vysokých teplotách dosahujících až 260 °C. Výhodou je taktéž použití bez nutnosti mazání, vysoká pevnost a odolnost vůči opotřebení. Jedním z hlavních kandidátů této řady je VESPEL SP-3 obsahující 15 % MoS<sub>2</sub>. To potvrzuje i databáze NASA, dle které splňuje podmínku maximální 1% ztráty hmotnosti (TML). Tento materiál byl již použit v ruské vesmírné misi v konstrukci oddělovacího zařízení části rakety, a to zejména kvůli jeho velmi nízkému součiniteli tření. [5] [7]

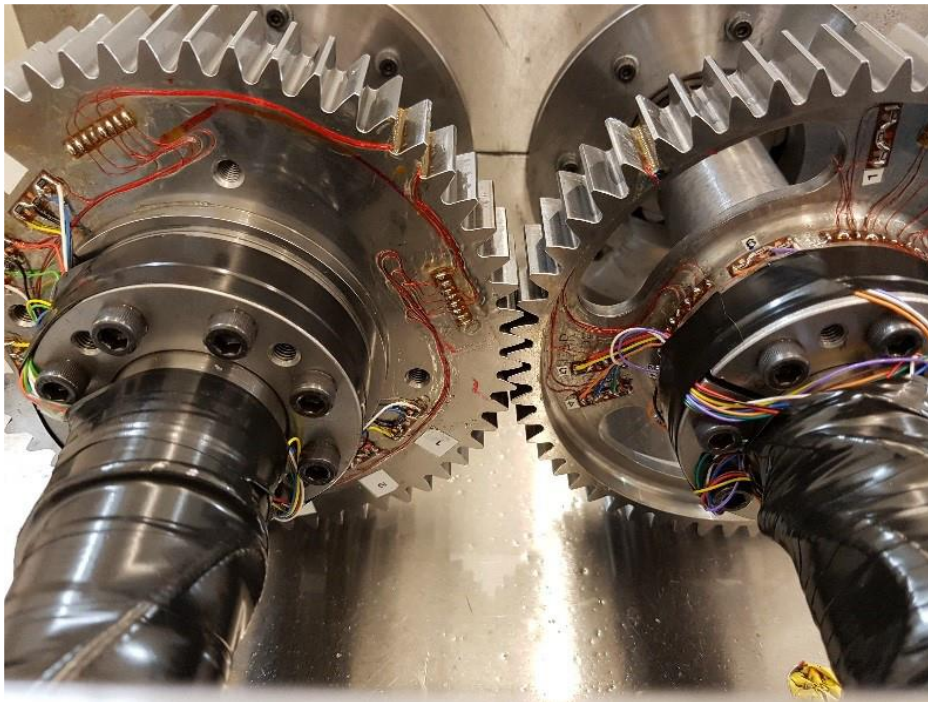
Tab. 2-3 Materiálové charakteristiky Vespel SP-3 [8]

Materiálové charakteristiky	Jednotky	Hodnoty
Hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,6
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	58,5
Tvrдость	HRE (Rockwell)	40-55
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	52
TML	[%]	0,54

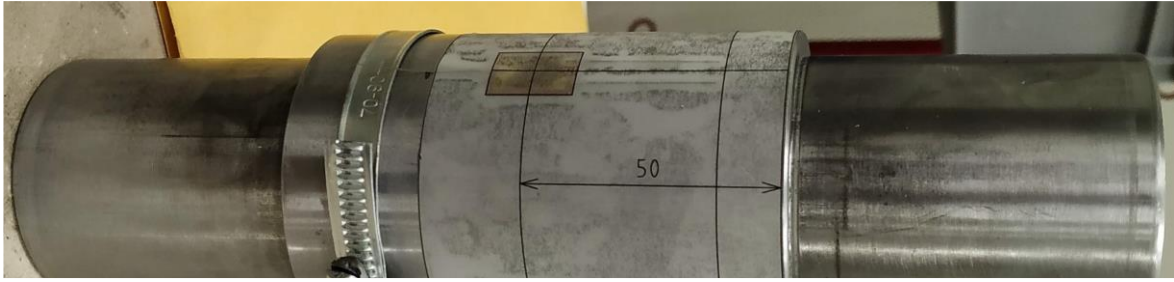
## 2.3 Přehled relevantních metod měření součinitele tření

### 2.3.1 Měření pomocí tenzometrů (strain gauges)

Jednou z hojně využívaných metod pro získání hodnoty součinitele tření může být využití tenzometrů. Využití tenzometrických snímačů při testování ozubených kol lze vidět na obrázku 2-2. Obecně jsou tenzometrické snímače odporové součástky, pomocí kterých lze vypočítat velikost odporu v závislosti na změně geometrie při daném zatížení. Pokud známe materiálové charakteristiky tělesa, a právě tuto změnu geometrie (deformaci), jsme schopni získat velikost zatěžovací síly. Druhů tenzometrů existuje několik, v tomto případě je nutno se zaměřit na dva druhy snímačů. Tenzometrické snímače pro měření napětí a na snímače využívané pro měření kroutícího momentu. Dále lze tenzometry dělit na kovové či polovodičové. V tomto případě nás budou zajímat kovové tenzometry, přesněji foliové (viz Obr. 2-3). Značnou výhodou tohoto typu tenzometrických snímačů je vysoká přesnost a téměř libovolná konfigurace měřicí mřížky. [9]



Obr. 2-2 Tenzometrické snímače umístěny na tělo ozubeného kola a patu zubu [15]



Obr. 2-3 Foliový tenzometrický snímač přilepený na hřídel s účelem měření kroutícího momentu [16]

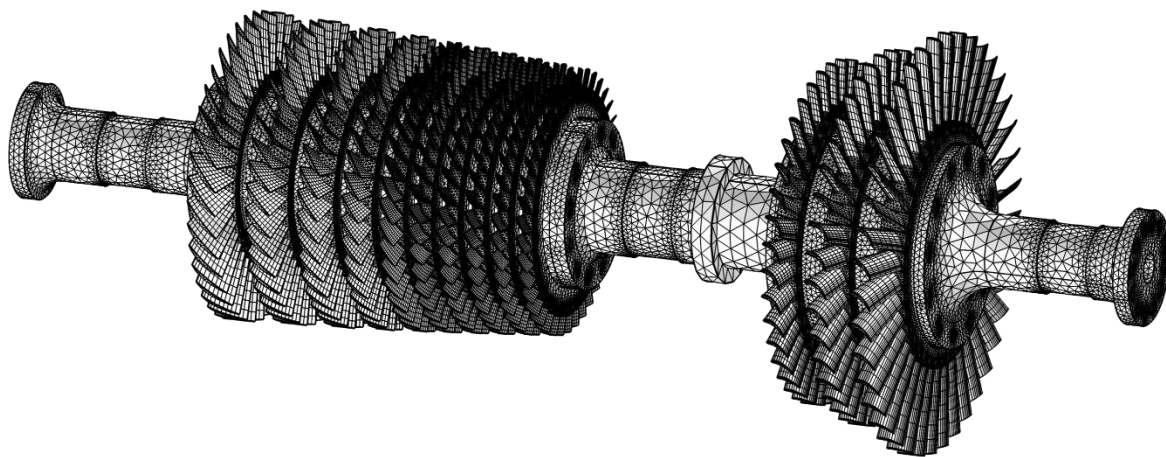
### 2.3.2 Měření pomocí metody MKP

MKP neboli Metoda konečných prvků je jednou z dominantních numerických metod využívaných pro pokročilé modelování různých problémů mechaniky (přestup tepla, proudění tekutin, hodnocení životnosti součástí atd.). Základy této metody byly popsány v první polovině 20. století, odkud byla metoda nadále rozvíjena. Základním stavebním kamenem MKP jsou prvky konečných rozměrů, které mají tvar mnohoúhelníků, nejčastěji trojúhelníků (viz Obr. 2-4, kde je využito trojúhelníkové a čtvercové geometrie). Podstatou řešení je rozdělení oblasti na námi definovaný počet podoblastí tvořených konečným počtem prvků a následné matematické řešení požadovaných vlastností v uzlech. Uzly nazýváme například jednotlivé vrcholy trojúhelníků, ve kterých hledáme dané charakteristiky. Metodu konečných prvků lze rozdělit na tři větší operace.

**1) Preprocessing** – příprava na řešení problému. V první části se zadávají vstupní hodnoty (zatížení, materiálové charakteristiky atd.), následovně je vytvořena síť prvků a definována jejich hustota v daných oblastech. Samotná hustota prvků je podstatným faktorem tvorby sítě, jelikož časově ovlivňuje výpočetní část – processing. Pro efektivitu výpočetní části a zároveň získání přesných hodnot se využívá různých počtů prvků v daných oblastech modelu (viz Obr. 2-4), kde lze vidět že v kritických místech (vruby, změny průměru) se vyskytuje značně větší počet prvků než v nekritických oblastech.

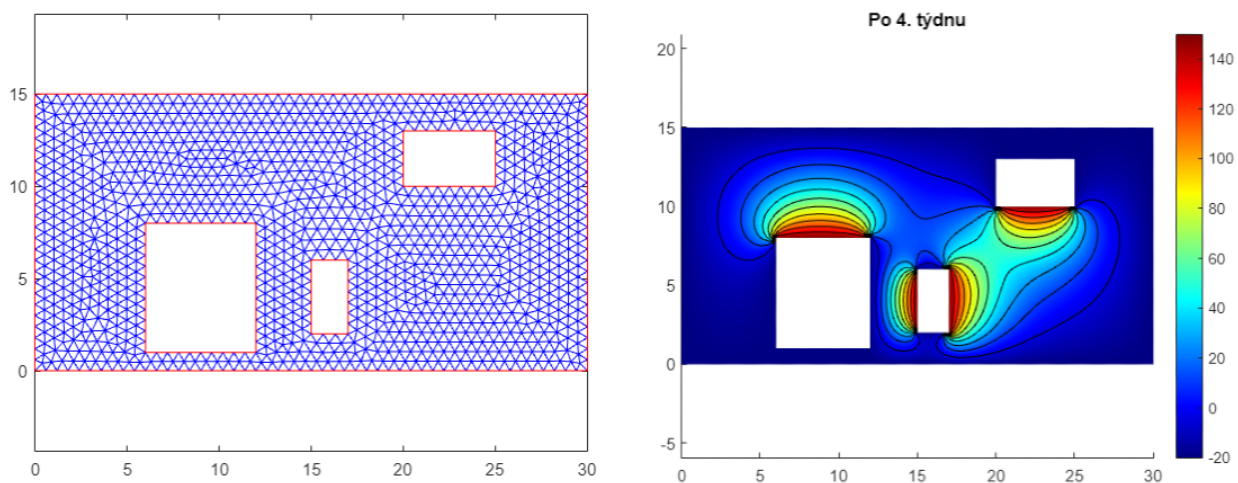
**2) Řešení (Solution)** – samotný výpočet. V této části získáme numerickým řešením veškeré požadované výsledky.

**3) Postprocessing** – vyhodnocení výsledků. V závěrečné části jsou výsledky z druhé operace graficky zpracovány a vyhodnoceny do lépe pochopitelné formy. [10]



Obr. 2-4 Hybridní síť metody konečných prvků [17]

V praxi se metoda konečných prvků často aplikuje v uživatelsky přívětivějších programech, jako jsou například ANSYS™, SimScale™, COMSOL Multiphysics™ nebo například i MATLAB™ či Autodesk™ Inventor.

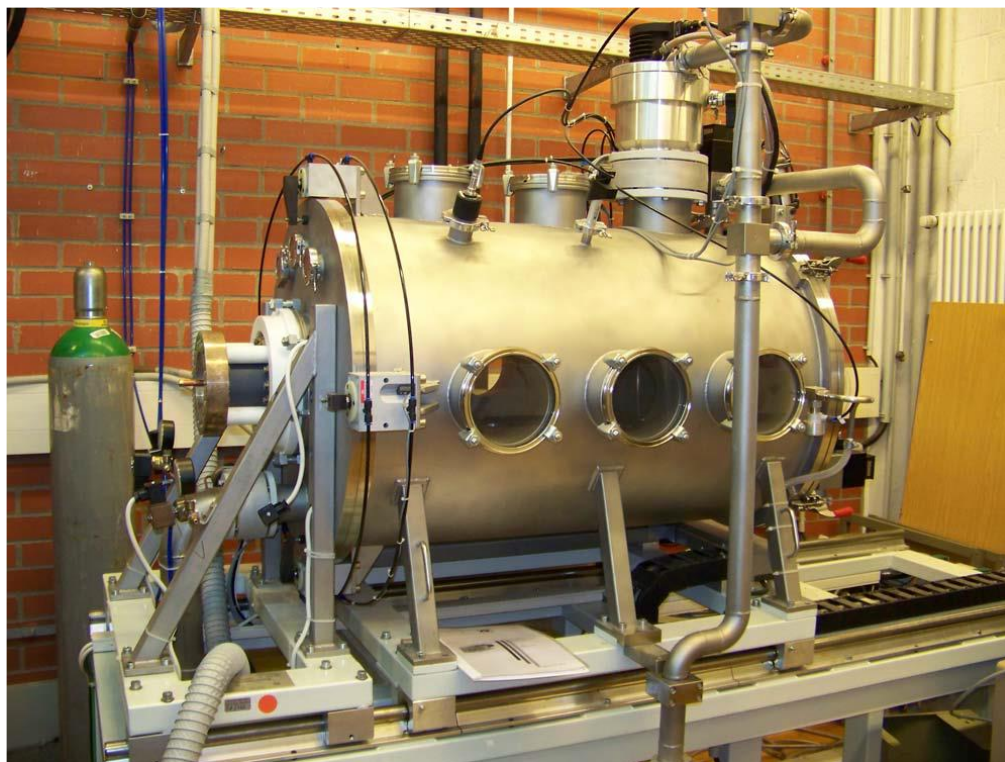


Obr. 2-5 Příklad využití MKP v programu MATLAB pro výpočet vedení tepla

## 2.4 Přehled relevantních testovacích zařízení ozubených kol

### 2.4.1 Tester vyvinutý Mnichovskou univerzitou pro testování materiálu PEEK [5]

Tester byl vyvinutý s cílem otestování chování ozubených kol vyrobených z poly-ether-ether-etonových vláken – PEEK. Jak již bylo zmíněno, tento materiál disponuje velmi dobrými materiálovými charakteristikami a díky tomu by mohl být využitý i pro výrobu ozubených kol použitých ve vesmírném prostředí. Přesněji byl tester vyroben pro určení koeficientu opotřebení a následnému určení vůle soukolí. Pro dosažení vesmírného prostředí byla využita termovakuová komora splňující požadavky v tabulce (Tab. 2-5).



Obr. 2-6 Termovakuová komora

Testování materiálu probíhalo při 4 odlišných podmínkách:

- 1) při okolním tlaku a teplotě +20 °C (laboratorní podmínky),
- 2) ve vakuu a teplotě +20 °C,
- 3) ve vakuu a teplotě +80 °C,
- 4) ve vakuu a teplotě -55 °C.

Při tomto experimentu byl využitý pastorek vyroben z materiálu PEEK s následujícími parametry:

Tab. 2-4 Parametry použitého pastorku

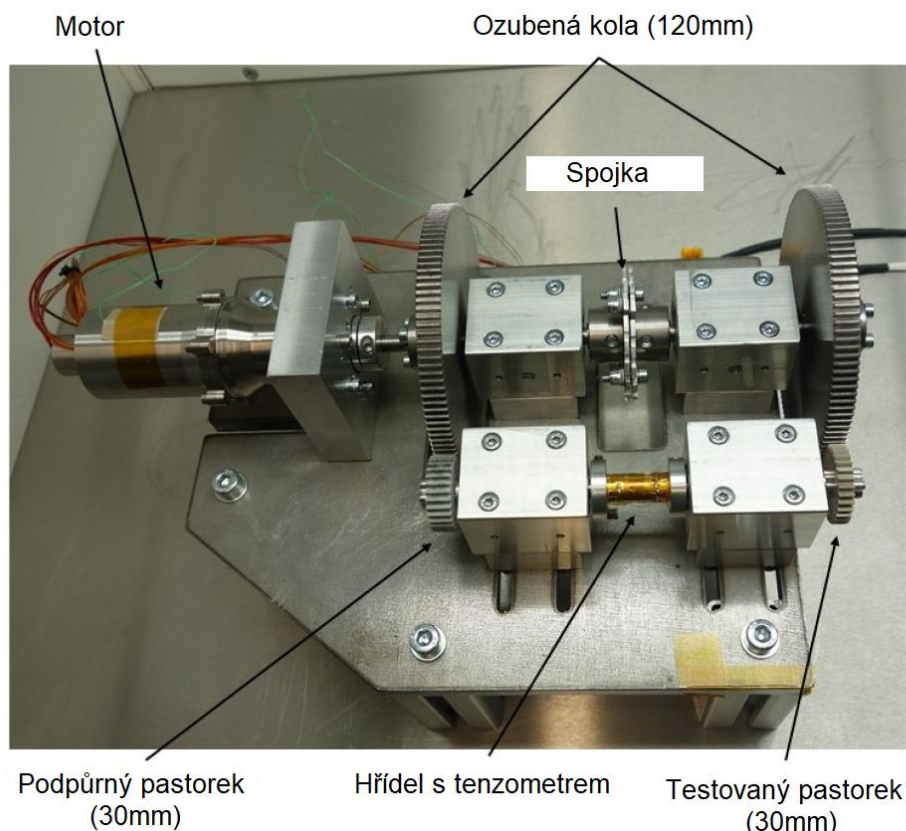
Typ ozubeného kola	Ozubené kolo s přímými zuby		
Modul	$m_1$	[mm]	1
Počet zubů	$z_1$	[-]	30
Záběrový úhel	$\alpha$	[°]	20
Šířka ozubení	$b_1$	[mm]	20
Průměr roztečné kružnice	$d_1$	[mm]	6

Pro určení koeficientu opotřebení byla využita metoda dotyku, při které je nutné změřit ztrátu materiálu zubu ozubeného kola. Při provedení jednoho cyklu dochází k opotřebení třením a tím i ke ztrátě materiálu na jednotlivých zubech. Pro určení této ztráty hmotnosti bylo použito CNC zařízení společně s měřicí sondou, pomocí kterého se po každém cyklu změřil obrys daného zubu a tím byl zjištěn rozdíl materiálu.

Tab. 2-5 Požadavky zařízení pro provedení testu

Nutné vlastnosti testeru
Schopnost fungovat ve vakuu o hodnotě až $10^{-5}$ mbar
Schopnost fungovat při teplotách v intervalu od $-55$ °C až do $+80$ °C
Měnitelné veličiny (např. točivý moment dle požadavků)
Konstantní točivý moment působící na pastorek při 500 000 cyklech
Konstantní úhlová rychlost pastorku
Monitorování velikosti točivého momentu

Samotné testovací zařízení se skládá ze 4 ozubených kol (viz Obr. 2-7), přičemž právě jedno z nich je tím, které bylo monitorováno. Poměr převodu je 1:4 a osovou vzdálenost lze upravit dle potřeby v intervalu 70 mm až 85 mm. Zatížení je měřeno pomocí tenzometru umístěném na měřící hřídeli. Jako pohon byl využitý krokový motor schopný pracovat ve vakuu a při teplotách  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Společně s motorem je použita i planetová převodovka s poměrem 20:1.



Obr. 2-7 Testovací zařízení

Výsledky testování po zhruba 350000 cyklech ve všech čtyřech okolních podmínkách prokázaly následující: koeficient opotřebení se výrazně měnil v závislosti na teplotě, přičemž maximální hodnoty bylo dosaženo při  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve vakuu. S tímto souvisí i velikost vůle, která se zvýšila s rostoucí hodnotou koeficientu. Důležité je brát v potaz, že velikost vůle vzrostla na dvojnásobnou hodnotu (při  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a vakuu) oproti laboratorním podmínkám. Nejnižší hodnoty koeficientu opotřebení bylo dosaženo ve vakuu při teplotě  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Experiment prokázal, že zvýšení vůle způsobené opotřebením stále nepřekračuje povolené hodnoty při 100000 cyklech a zatížením 0,3 Nm.

## 2.4.2 Tester vyvinutý Mnichovskou univerzitou pro testování boční vůle [7]

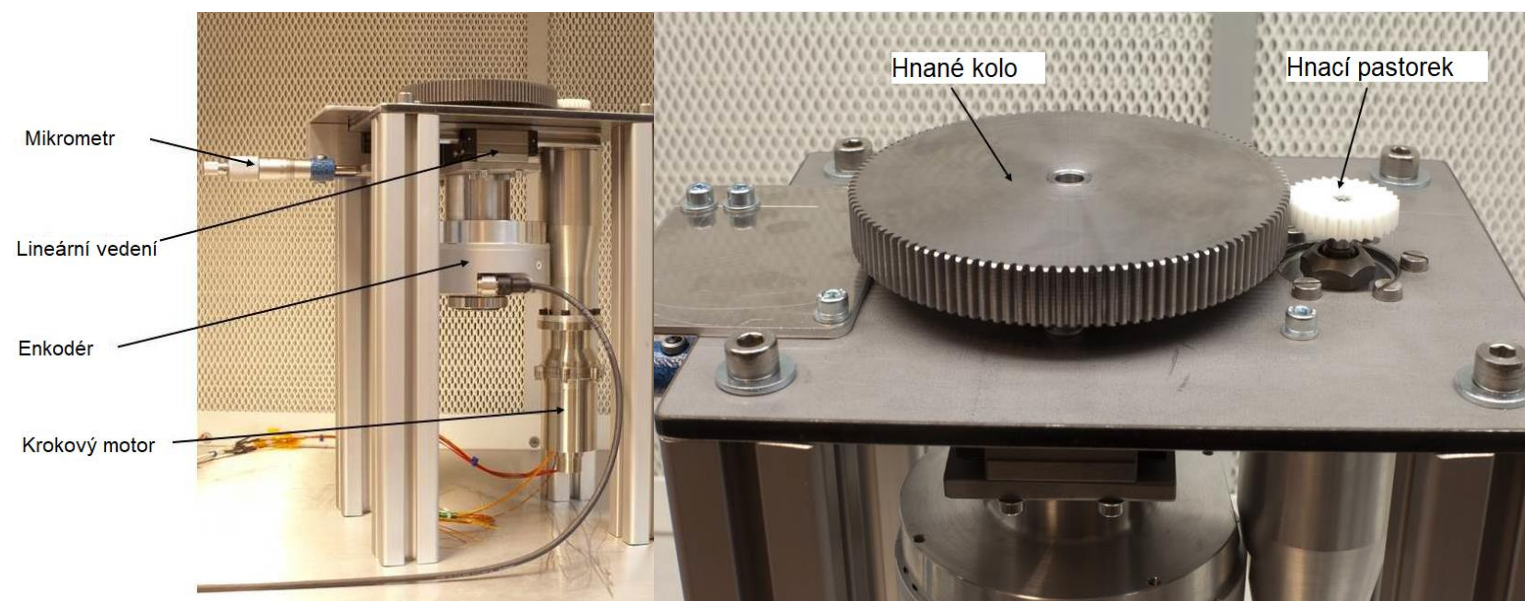
Tester vyvinutý téměř identickým týmem, avšak s odlišným účelem. Cílem experimentu bylo určení závislosti vůle mezi zuby (backlash) na geometrii ozubeného kola a osové vzdálenosti středů kol. Testovací zařízení je významné i kvůli použití ozubených kol vyrobených z polymerních materiálů, v tomto případě byl využit polyamid. Celý experiment je proveden z důvodu vylepšení polohovacího mechanismu antén, a proto se i celé testovací zařízení snaží co nejvíce přiblížit již použitému zařízení. Díky podobnosti testovacího zařízení a již používaného mechanismu lze dosáhnout užitečnějších výsledků, které mohou být nadále využity právě pro vylepšení stávajícího mechanismu.

Testovací zařízení se skládá ze sledovaného, ozubeného kola s charakteristikami popsány v tabulce (Tab. 2-6) a z poháněného pastorku o průměru roztečné kružnice 30 mm. Oba hřídele jsou uloženy ve vysoce přesných ložiscích pro zajištění přesného otáčení obou ozubených kol.

Tab. 2-6 Parametry hnacího kola

Typ ozubeného kola		Ozubené kolo s přímými zuby	
Materiál		Nerezová ocel 1.4305	
Modul	$m_1$	[mm]	1
Počet zubů	$z_1$	[-]	120
Šířka ozubení	$b_1$	[mm]	10
Průměr roztečné kružnice	$d_1$	[mm]	120
Záběrový úhel	$\alpha$	[°]	20

Jako pohon musel být použit velmi přesný krokový motor společně s harmonickou převodovkou. Jelikož se celé zařízení nachází v termovakuové komoře, musí být motor včetně převodovky schopen pracovat v těchto podmínkách, tedy v rozmezí teplot od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  a vakuu. Vůle byla měřena pomocí 26bitového absolutního enkodéru umístěném na hřídeli, která nese hnané kolo (viz Obr. 2-8). Enkodér byl využit pro měření pohybu hnaného kola. Zároveň je hnané kolo společně s enkodérem umístěné na lineárním vedení, což umožňuje měnit osovou vzdálenost a tím korigovat vůli. Pro měření této vzdálenosti byl využit mikrometr.



Obr. 2-8 Testovací zařízení

V experimentu byly využity tři odlišné geometrie polyamidového pastorku.

- 1) Nulová korekce zubu a redukce výšky hlavy zubu.
- 2) Korekce zubu 0,3 mm a nulová redukce výšky hlavy zubu.
- 3) Korekce zubu 0,3 mm a redukce výšky hlavy zubu 0,3 mm.

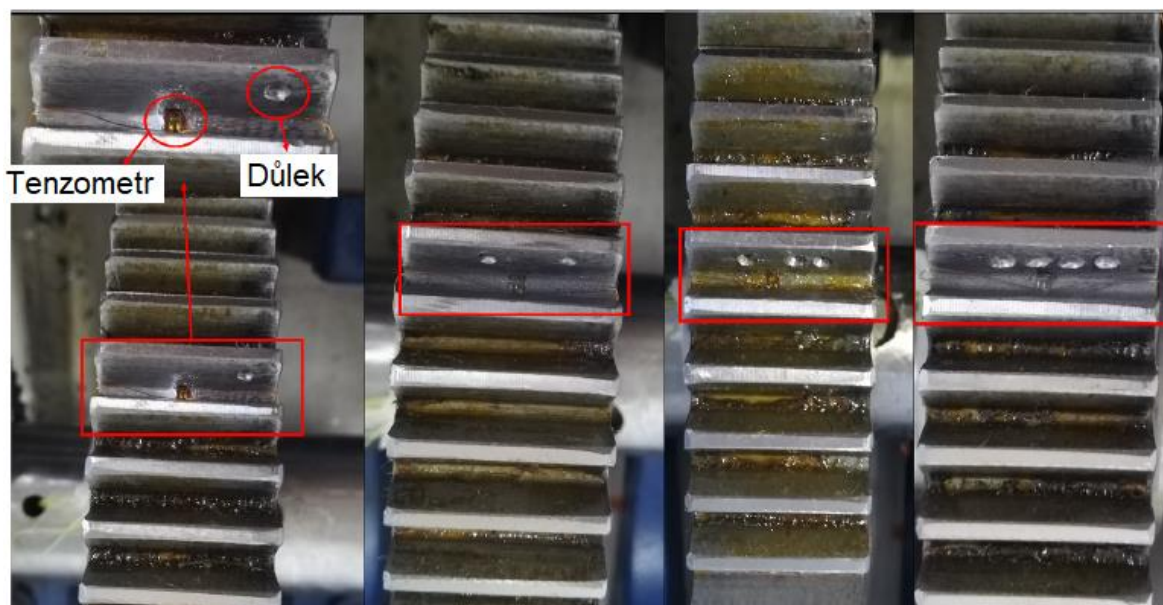
Vůle byla měřena jako funkční závislost na osové vzdálenosti. Měření probíhalo tak, že nejdříve byl motor zapnut v jednom směru otáčení pro zajištění kontaktu mezi zuby. Motor byl pak zapnut nejdříve jedním a následovně druhým směrem otáčení, přičemž se vždy v každém směru otočil o stejný počet kroků. Při těchto otočeních byla měřena vůle. Pokus byl opakován s různými osovými vzdálenostmi a se všemi třemi rozdílnými ozubenými koly.

Výsledky měření ukázaly, že nejmenší vůle bylo dosaženo pastorkem s geometrií popsanou v bodě 2). Redukce výšky zubu nejspíše zapříčinila vyšší hodnotu vůle. Zároveň experiment prokázal funkčnost a přesnost testovacího zařízení. To bylo potvrzeno osovou vzdáleností odpovídající teoretické osové vzdálenosti, při které dojde k nulové vůli.

### 2.4.3 Tester vyvinutý pro analýzu únavového porušení – pittingu [11]

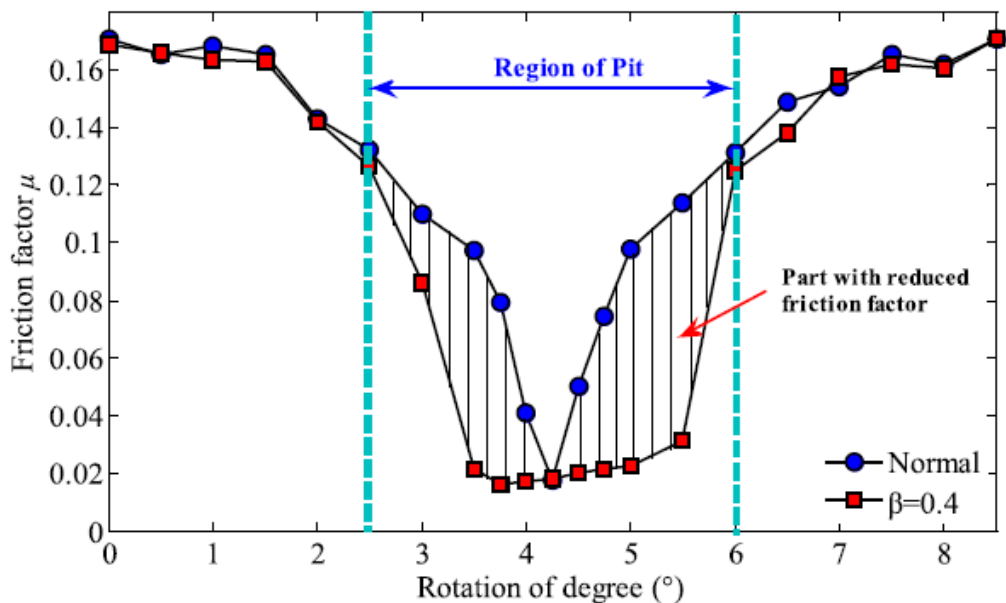
Mezi nejběžnější opotřebení ozubených kol lze zařadit tzv. pitting. Jedná se o formu únavového opotřebení, při které dochází k vydrolování materiálu. K pittingu dochází lokálně a projevuje se viditelnými důlky na boku zubu, tedy v kontaktu dvou zubů v záběru (viz Obr. 2-9). Jelikož se jedná o kontaktní únavu materiálu, souvisí s ní úzce i součinitel tření. Důsledkem pittingu je vyřazení daného ozubeného kola a tím i případné vyřazení celé převodovky, či jiného mechanismu.

Přestože zmíněné testovací zařízení nevyužívá polymerní ozubená kola, je pro nás významné využitými měřícími metodami. Cílem experimentu je určení hodnoty součinitele tření na různých částech zubu ozubeného kola a následný rozbor únavového porušení. Práce byla rozdělena na 4 různé situace: 1)  $\beta = 0,1 \rightarrow 1$  důlek na ozubeném kole; 2)  $\beta = 0,2 \rightarrow 2$  důlky; 3)  $\beta = 0,3 \rightarrow 3$  důlky; 4)  $\beta = 0,4 \rightarrow 4$  důlky. V první části byla vyjádřena tuhost záběru ozubených kol, která byla nadále využita v modelování metody konečných prvků. Důležitým bodem testu je výpočet součinitele tření pomocí MKP v kombinaci s metodou optimalizace. Pro reálné měření byly využity tenzometrické snímače umístěné v oblasti paty zubu, pomocí kterých byly zjištěny hodnoty zatížení v požadované oblasti. Změřené hodnoty zatížení byly použity v modelu konečných prvků společně s tuhostí záběru ozubení.



Obr. 2-9 Pozice tenzometru a důlku na ozubeném kole

Kombinací metody optimalizace, MKP a experimentálně naměřených hodnot byly získány hodnoty součinitele tření. Zisku hodnoty bylo docíleno porovnáním reálně naměřených hodnot zatížení na zubu a vypočtených hodnot zatížení z metody konečných prvků.



Obr. 2-10 Porovnání součinitele tření u nepoškozeného ozubeného kola (normal) a u kola se značným poškozením

Významnými výsledky této práce jsou naměřené hodnoty součinitele tření, kde jde zřetelně vidět změna velikosti tohoto součinitele. To potvrzuje funkčnost použitého testovacího zařízení a využitých metod.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

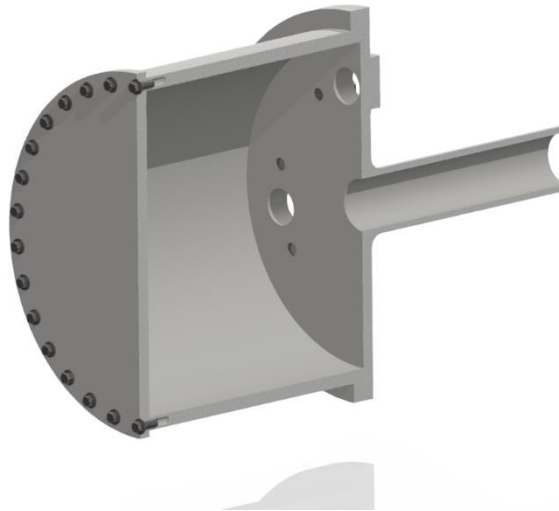
### 3.1 Analýza problému

Použití polymerních materiálů ve vesmírných misích by značně mohlo ovlivnit náklad a vybavení odesílané na oběžnou dráhu, a to zejména díky jejich nižší hmotnosti. Cílem kosmických organizací je odeslat co nejvíce nákladu jedním letem, čemuž může značně pomoci redukce váhy ostatních nutných komponentů. Vzhledem k nákladům (v současné době stále až desítky tisíc dolarů za kilo vybavení vynesené na nízkou oběžnou dráhu [12]) a složitosti procesu odesílání nákladu na oběžnou dráhu, je nutné, aby všechna odeslaná zařízení bezporuchově pracovala po dobu několika let. Bezporuchovosti je možné dosáhnout právě důkladným testováním v simulovaných podmínkách na Zemi.

Vypracovaná rešerše poukazuje na to, že v současné době není mnoho veřejně dostupných testovacích zařízení, které by řešily tuto problematiku. Je pochopitelné, že jak vládní společnosti (např. NASA), tak i komerční vesmírné organizace (SpaceX, Blue Origin) nezveřejňují prováděné experimenty a jejich konstrukční řešení. Důsledkem tohoto jsou často zastaralé zveřejněné dokumenty i technologie v nich zmíněná.

Polymerní ozubená kola by mohla být použita i v menších družicích, jako jsou třeba CubeSaty, které jsou na nízkou orbitu vysílány i univerzitními týmy.

Limitujícím faktorem při vypracovávání jednotlivých koncepčních řešení je velikost vakuové komory a její jednotlivé komponenty. Nám dostupná vakuová komora je tvaru hrnce značky Pfeiffer Vacuum. Schematický model lze vidět na obrázku níže (Obr. 3-1). Využitelný prostor komory má následující rozměry: vnitřní průměr hrnce –  $\varnothing 250$  mm, výška hrnce – 200 mm. Z vakuové komory vedou dvě speciální kabelové průchodky a jeden otvor pro umístění senzorů. Omezujícím vlivem bude také válcovitý tvar komory, zejména jmenovitá světlost.



Obr. 3-1 Schematický model vakuové komory

## 3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

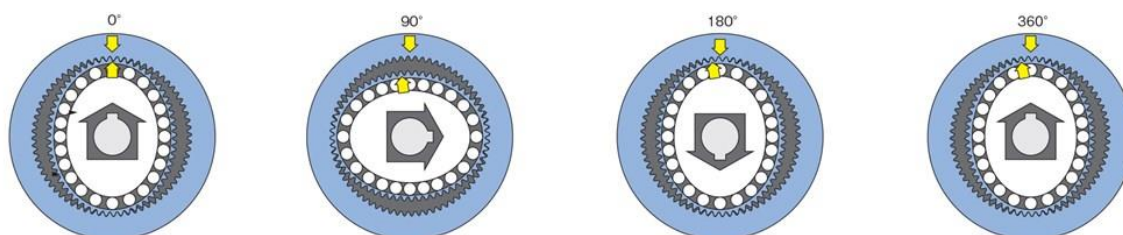
Prvním a podstatným omezením, co se týče výběru jednotlivých komponentů, je vakuum. Veškeré součásti, ze kterých budou jednotlivá koncepční řešení sestavena, musí odolat tlaku až do  $10^{-10}$  Pa. [3] Působení vakua zužuje výběr použitelných motorů, převodovek, ale i ložisek. Společně s vakuem ve vesmírných podmínkách působí i radiace, která v této práci nebude zohledněna. Pokud by však bylo termální vlivy potřeba zohlednit, musela by se použít termovakuová komora schopná vyvinout požadované teploty (interval teplot od  $-55$  °C do  $80$  °C [5]) a zároveň i komponenty, které by v těchto teplotách byly schopny bezporuchově pracovat.

Výběr materiálu ozubených kol je také značně limitován, především kvůli hodnotám odpařování. Mezi vhodné materiály lze nepochybně zařadit různé modifikace Poly-ether-ether-keetonových vláken (PEEK) nebo modifikace polymerních materiálů firmy DuPont™. Koncepční řešení by měla být univerzální, a tudíž by neměl být problém změnit materiál ozubeného kola bez nutnosti výměny celého aparátu.

Co se týče možných metod měření, jsou nejpodstatnější tenzometrické snímače, kterých existuje široká škála. Díky tomu lze vybrat požadovaný snímač, který bude splňovat všechny nutné podmínky. Hlavním kladem tenzometrů je zejména jejich kompaktnost. Snímače mohou být přilepeny (popř. přivařeny) jak na boky zubů v záběru, tak ale i na samotnou hřídel pro měření točivého momentu. V kombinaci s metodou konečných prvků lze určit přesné umístění snímačů a zároveň i docílit vypočtení požadovaných hodnot. (viz kap. 2.4.3). [9] [10] [11]

Při mnichovském experimentu testujícím materiál PEEK (kap. 2.4.1) bylo využito právě zmíněných tenzometrických snímačů, které v tomto případě měřily zatížení na hřídeli. Z testovacího zařízení si lze odnést použití jednotlivých součástí, přičemž se i v následujících experimentech vždy vyskytuje krokový motor. Důvod využití krokového motoru je poměrně jasný, a to zejména díky kontrolovatelnosti jeho otáček – jemnosti jednotlivých kroků = malých úhlů otáčení. Společně s motorem byla využita planetová převodovka. Planetové převodovky disponují velmi dobrými vlastnostmi, jako jsou například malé hodnoty vůle (backlash) nebo vysoké převodové poměry, a díky tomu jsou vhodnými adepty pro použití v koncepčních řešeních. [5]

V druhém mnichovském experimentu zaměřeném na měření boční vůle (kap. 2.4.2) byl využit odlišný koncept celého testeru, kde je konstrukce testovacího zařízení orientovaná vertikálně, tedy testovaná ozubená kola jsou v horizontální poloze. Tento rozdílný přístup může být brán v potaz jako možné koncepční řešení, jelikož námi dostupná vakuová komora má tvar válce a může být také orientovaná jak ve vodorovném, tak i ve svislém směru. Stejně tak i v tomto experimentu byl použitý přesný krokový motor, avšak s odlišnou převodovkou. V tomto případě byla využita harmonická převodovka. Jedná se o speciální druh převodovky, ve které se využívá odvalování flexibilního ozubeného kola po věnci s vnitřním ozubením (viz Obr. 3-2).



Obr. 3-2 Schéma chodu harmonické převodovky [19]

Tento druh převodovky disponuje skvělými vlastnostmi. Mezi ně patří nulová vůle (backlash), kompaktní velikost a vysoká přesnost. [13] Díky těmto vlastnostem je harmonická převodovka vhodná pro využití v koncepčních řešeních. Dalším podstatným konstrukčním řešením tohoto testeru je umístění hnaného kola na lineární vedení, které umožňuje nastavení osové vzdálenosti soukolí. [7]

Třetí vypracovaný experiment (kap. 2.4.3) utvrzuje použití tenzometrických snímačů a metody konečných prvků. Na testovacím zařízení lze vidět minimální velikost tenzometrů, a tedy i vhodnost jejich použití v koncepčních řešeních.

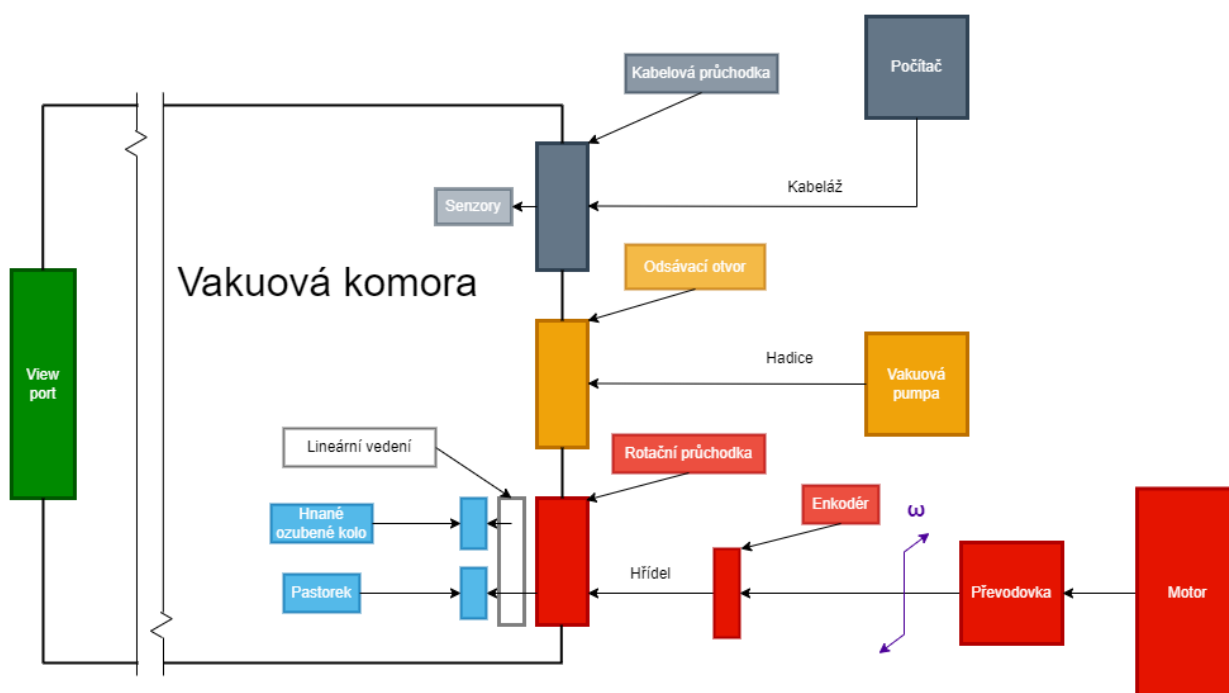
### 3.2.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je vypracování detailního konceptu testeru, který má za úkol měřit tření mezi jednotlivými zuby v záběru. Tento tester musí být schopen pracovat bezporuchově v simulovaných podmínkách, tedy ve vakuu. Mezi dílčí cíle práce patří vypracování přehledu testovacích zařízení využívaných pro testování ozubených kol, tvorba konceptů testovacího zařízení, volba a zdůvodnění finálního zpracovaného modelu včetně vypracování jeho 3D modelu.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Konceptční návrh č. 1

První konceptční návrh se opírá o hlavní, nejpodstatnější součást a tou je rotační průchodka. Průchodka umožňuje vstup rotujícího dílu podstavou vakuové komory. V tomto případě je rotujícím dílem hřídel. Díky tomuto řešení lze veškerou pohonnou soustavu přesunout mimo kritické prostředí vakua. Touto konfigurací lze dosáhnout flexibility celé soustavy, jelikož není nutno hledat speciální typy motorů, převodovek, ale ani materiálů hřídele a dalších částí soustavy.



Obr. 4-1 Schematické zobrazení konceptního návrhu č. 1 (pohled shora)

Podstatným faktorem upravující konstrukci vakuové komory je také tzv. viewport. Jedná se o okno/hledí, kterým lze vidět dovnitř vakuové komory. Nejjednodušším řešením by byla výměna boční podstavy vakuové komory. Tato nerezová část by se nahradila akrylátovým průhledným víkem umožňujícím pohled dovnitř komory.

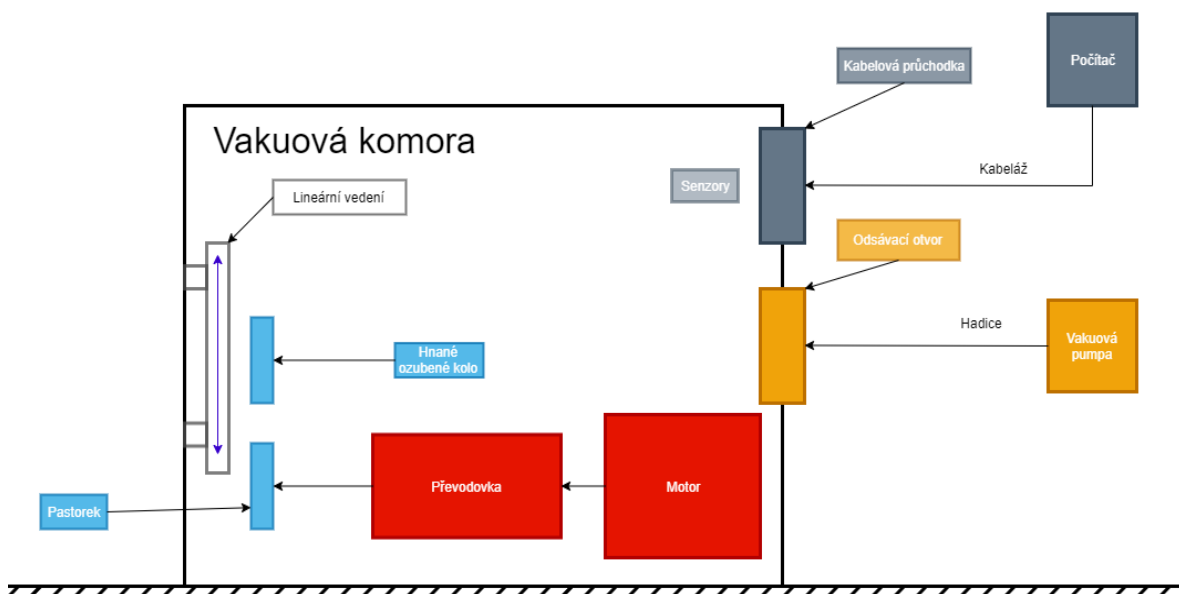
Hlavní výhodou výše zobrazeného uspořádání je možnost využití běžných motorů a převodovek. Zároveň by se i značně snížila cena jednotlivých komponentů právě kvůli absenci vakua ve vnějším prostředí.

Velmi dobrým kandidátem na převodovku by byla planetová převodovka. Ta disponuje malými vůlemi a vysokou přesností. Co se týče motoru, přichází v úvahu krokový motor. K přesnému měření otáček by mohl být využitý enkodér.

Koncepční návrh č. 1 má však dvě hlavní nevýhody. První nevýhodou je samotná rotační průchodka. Ta není dokonalá a vznikají v ní určité tlakové ztráty, které musí být následně vyrovnávány. Další nevýhodou této průchodky jsou i samotné technické parametry – nízké točivé momenty, rozměry hřídelů a například i omezené hodnoty otáček. Druhou značnou nevýhodou je potřeba velkého prostoru z vnějšku vakuové komory, jelikož značná část celého mechanismu by se nacházela mimo vakuovou komoru.

## 4.2 Koncepční návrh č. 2

Druhý koncepční návrh nevyužívá zásahu do samotné konstrukce vakuové komory. Celý mechanismus je uložen uvnitř prostoru vakuové komory, což zajistí celkovou kompaktnost a jednoduchost celé sestavy. Zároveň je tímto konstrukčním řešením zajištěna izolace vnitřního prostoru vůči tlakovým ztrátám vzniklým při předešlém návrhu. Pokud by byl nutný pohled dovnitř vakuové komory, musela by být upravená střední válcovitá část komory. Samozřejmě i toto řešení je možné, avšak by bylo lepší zakoupit komoru již obsahující okno.



Obr. 4-2 Schematické zobrazení koncepčního návrhu č. 2

Prostor levé podstavky, v kterém bylo v předešlém koncepčním návrhu umístěno okno, by byl plně využit. Na této podstavě je umístěno lineární vedení umožňující přesné zajištění poháněného kola. Díky konstrukci lineárního vedení by tak šlo přesně nastavit osovou vzdálenost soukolí a tím přidat do měření další faktory ovlivňující požadované parametry. Osová vzdálenost by mohla být měřena například elektronickým mikrometrem schopným pracovat ve vakuu. Co se týče pohonné soustavy, jako pohon by byl využit tzv. aktuátor. Jedná se o spojení velmi přesného krokového motoru společně s harmonickou převodovkou. Díky této kombinaci lze dosáhnout velmi vysoké přesnosti otáčení společně s nulovou vůlí. Celá jednotka je schopna pracovat ve vakuu a v dnešní době se používá zejména v polohovacích zařízeních antén kvůli kompaktnosti celé sestavy.

Jak již bylo zmíněno, hlavní výhodou koncepčního návrhu č. 2 je jeho kompaktnost a jednoduchost. Zejména právě jednoduchost a nízký počet jednotlivých komponentů snižuje poruchovost a obtížnost sestavení celé soustavy.

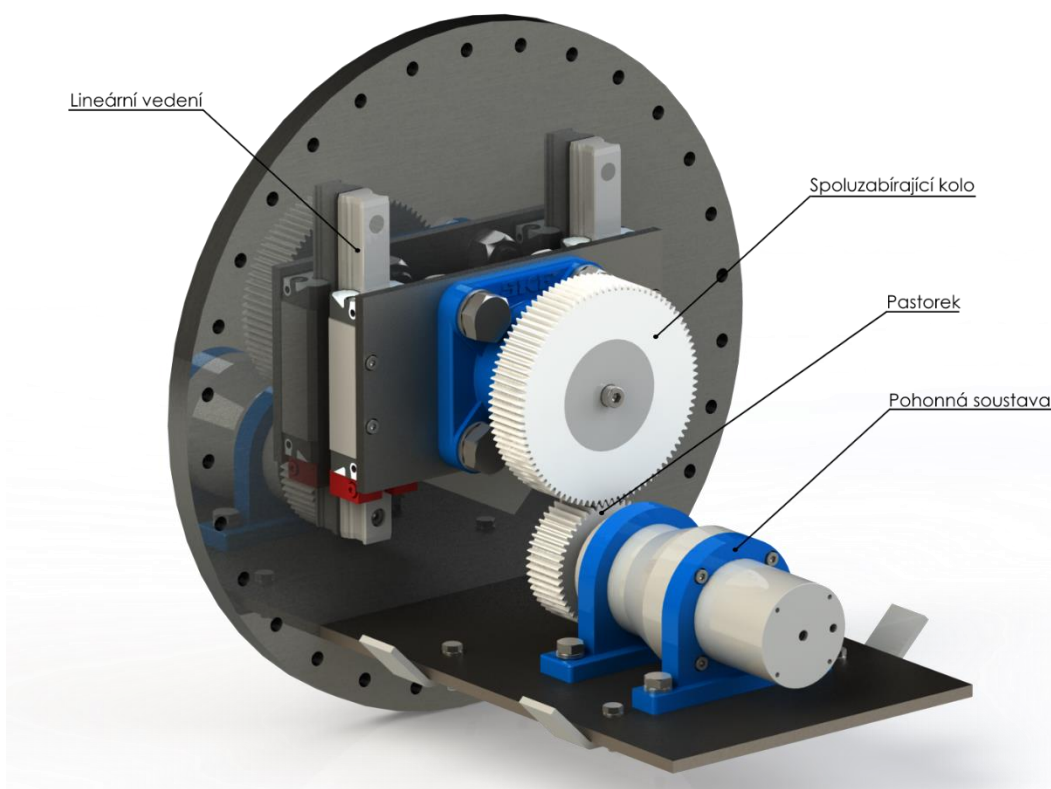
Hlavní a snad jedinou nevýhodou návrhu mohou být vyšší pořizovací náklady. U součástí pracujících ve vakuu může cena přesáhnout více než dvojnásobně cenu stejných součástí pracujících v běžném laboratorním prostředí.

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude představeno finální koncepční řešení, které vychází z konceptů zmíněných v předchozí kapitole. Finálním řešením bylo vybráno koncepční řešení č. 2, které lze vidět na obrázku. (Obr. 5-1).

### 5.1 Finální koncepční řešení

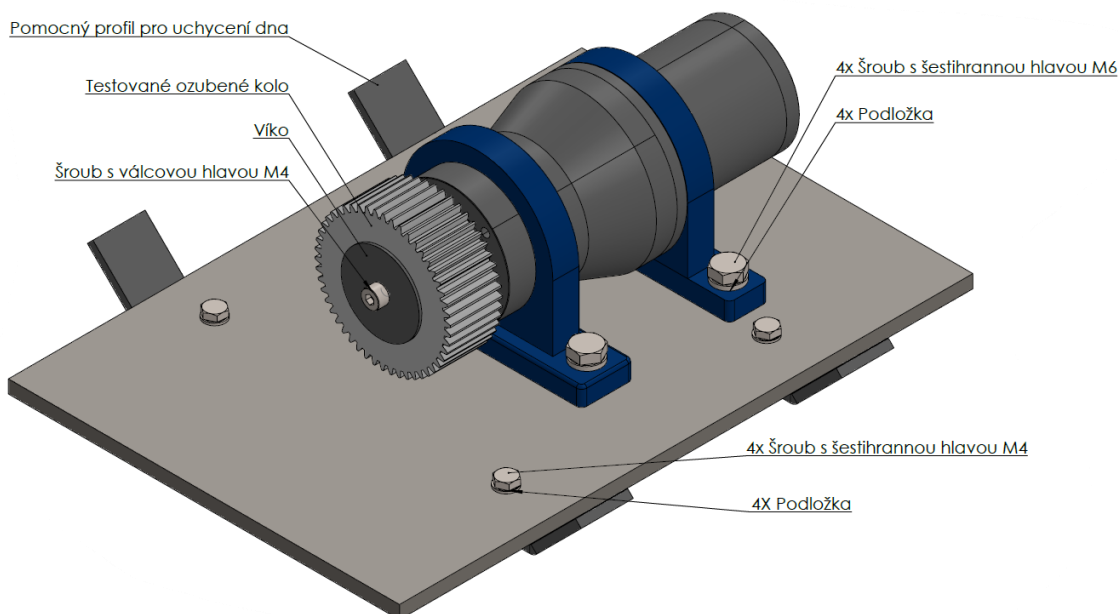
Jako finální koncepční řešení bylo vybráno řešení č. 2. I přes možné vyšší pořizovací náklady (pohonné soustavy) byl tento koncept vybrán kvůli jeho kompaktním rozměrům a jeho jednoduchosti. Oproti koncepčnímu návrhu č. 1 zde není přítomný téměř žádný průchod do laboratorního okolí, tudíž nevznikají žádné tlakové ztráty. Zároveň zde byly vybrány komponenty, které se již objevily ve vesmírných aplikacích, což zvyšuje adekvátnost simulovaných podmínek celého řešení. Finální koncepční návrh byl rozdělen do několika podsestav, které jsou nadále detailně rozebrány.



Obr. 5-1 Render finálního testovacího zařízení

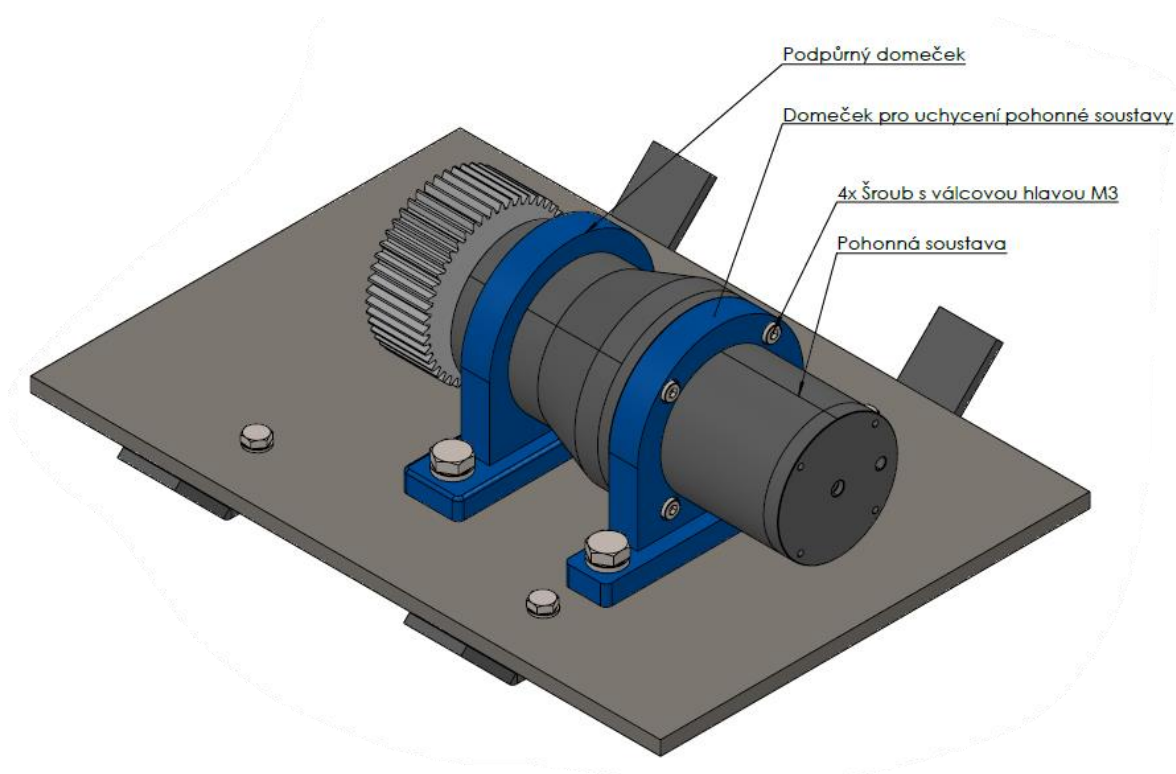
### 5.1.1 Pohonná soustava

Jako řešení pohonné soustavy je využít krokový motor disponující velmi kompaktními rozměry společně s velmi přesnými jednotlivými kroky. Motor byl vybrán vzhledem k již předešlému využití vesmírnými organizacemi, a to zejména v polohovacích systémech antén. Jako výrobce byla vybrána firma Phytron, jejíž motory byly využity například i v současné konstrukci satelitu Jamese Webba. Po kontaktování firmy a společné konzultaci byl vybrán motor Phytron nesoucí označení VSS 42.200. Motor je schopný vyvinout točivý moment dosahující až 120 Nmm. Zároveň motor vyniká svými kompaktními rozměry, kde pro nás podstatná délka motoru odpovídá 54 mm. Motory třídy VSS jsou schopny vystát hodnoty tlaku až do  $10^{-11}$  hPa a zároveň splňují i velmi nízké hodnoty odpařování. Motor byl taktéž vybrán z důvodu možného použití v termovakuové komoře, která by umožnila budoucí testování, ve kterém by byly zahrnuty i termální vlivy.



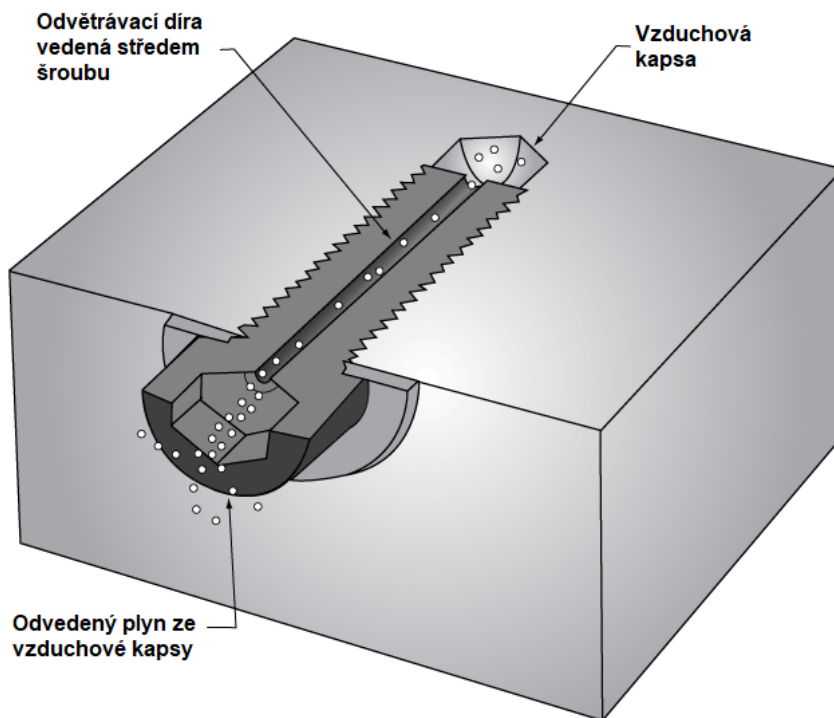
Obr. 5-2 Schematický popis pohonné soustavy (pohled zepředu)

Společně s krokovým motorem je využita harmonická převodovka. Harmonická převodovka byla taktéž doporučena firmou Phytron. Tento typ převodovky byl vybrán z důvodu předešlého použití v polohovacích mechanismech antén.



Obr. 5-3 Schematický popis pohonné soustavy (pohled zezadu)

Výstupem z této pohonné jednotky je hřídel o průměru  $\varnothing 10\text{mm}$ . Pro přenesení točivého momentu je využito tvarového prvku na hřídeli motoru (sražení na plochu). Toto řešení bylo vybráno zejména kvůli malým rozměrům hřídele, jednoduchosti a nízké ceně. Celá pohonná soustava je upevněna do pomocného dna (viz Obr. 5-2 a 5-3). U celého testovacího zařízení vzniká problém u neprůchozích děr, kdy při pumpování vakua dochází ke vzniku vzduchových kapes (viz Obr. 5-4). Proto, kde je to možné, jsou díry vrtány skrz daný díl, pomocí čehož lze tyto kapsy eliminovat. Dalším možným řešením je využití šroubu s odvětrávací dírou, které jsou ale značně dražší oproti normálním šroubům. V tomto případě je využito díry vyvrtané skrze dno a celá pohonná soustava je uložena pomocí šroubů s šestihlannou hlavou a matic.



Obr. 5-4 Schéma šroubu s odvětrávací dírou [20]

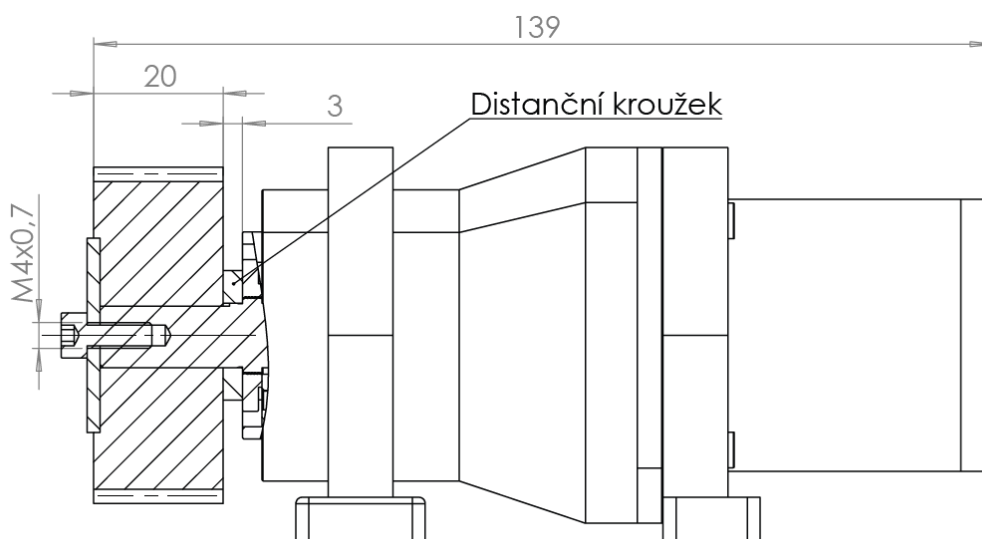
### 5.1.2 Metoda měření

Cílem této práce je koncepční návrh testeru, pomocí kterého máme být schopni měřit tření v ozubeném soukolí. Podle rešeršní části této práce bylo zvoleno měření pomocí foliových tenzometrických snímačů umístěných na boky zubů poháněného kola – pastorku. Tato metoda bude využita k získání výsledků společně s využitím metody konečných prvků, tedy pomocí simulace na počítačovém modelu.

### 5.1.3 Pastorek

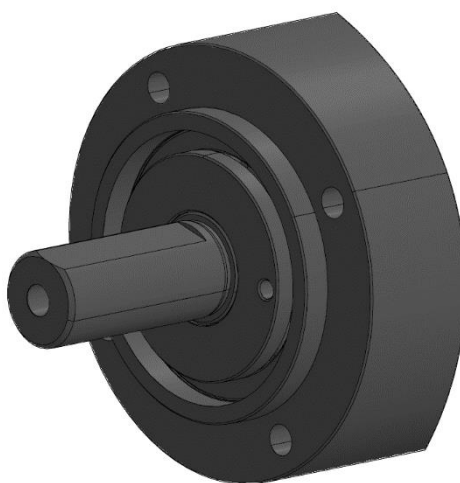
Rozměry pastorku se odvíjí od uložení pohonné soustavy. Jelikož je výstupní hřídel ve výšce 32 mm, musí průměr patní kružnice pastorku dosahovat rozměru menšího než 30 mm. Pokud by rozměr dosahoval vyšších hodnot, došlo by ke kolizi s nosným dnem. Pokud by bylo nutné využít pastorku s většími rozměry, musela by se pohonná soustava uměle vyvýšit.

Jako materiál pastorku byl zvolen poly-ether-ether-keton (PEEK). Materiálové charakteristiky jsou zmíněny výše. Ozubení lze vyrobit s vysokou přesností pomocí 3D tisku, například pomocí metody SLS (Selective Laser Sintering). Ozubené kolo je zvoleno s přímým ozubením, avšak vzhledem k šířce ozubení lze tento typ nahradit například šikmými zuby nebo i jiným druhem. Hodnota šířky ozubeného kola byla vzhledem k výstupní hřídeli zvolena jako 20 mm. Modul byl vybrán jako 1 mm. Rozměr ozubeného kola, pro nás podstatný průměr patní kružnice, se odvíjí od počtu zubů. Hodnota počtu zubů odpovídá 50, tudíž průměr patní kružnice je 52 mm.



Obr. 5-5 Schematické zobrazení uložení pastorku

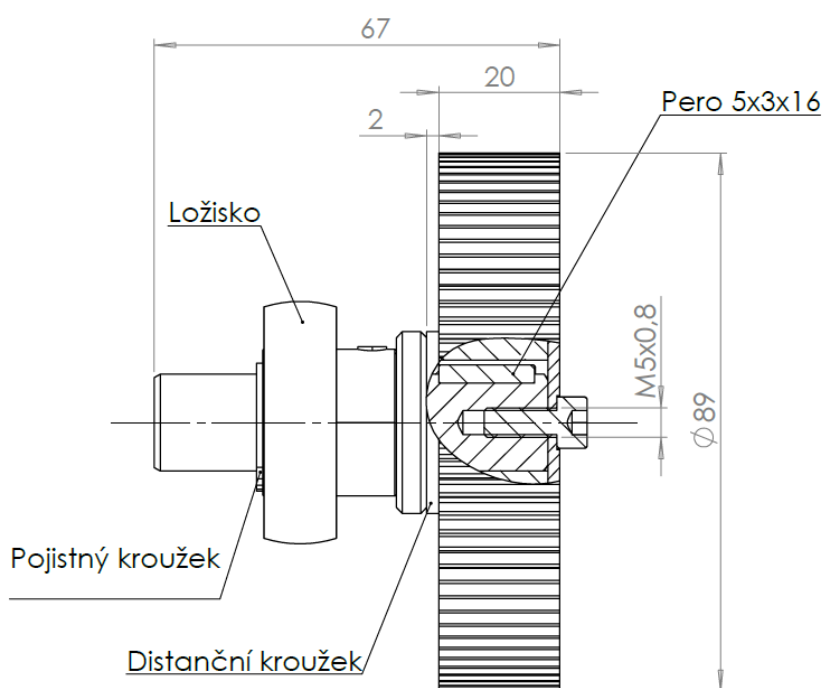
Pastorek je na hřídeli axiálně zajištěn pomocí víka a šroubu s válcovou hlavou. Axiální vymezení vůle je dosaženo pomocí distančního kroužku. (viz Obr. 5-5). Pomocí tohoto distančního kroužku lze taktéž upravovat šířku ozubeného kola. Přenosu točivého momentu je docíleno pomocí již zmíněného konstrukčního prvku na výstupní hřídeli motoru (viz Obr. 5-6).



Obr. 5-6 Tvarový prvek na hřídeli (sražení na plochu)

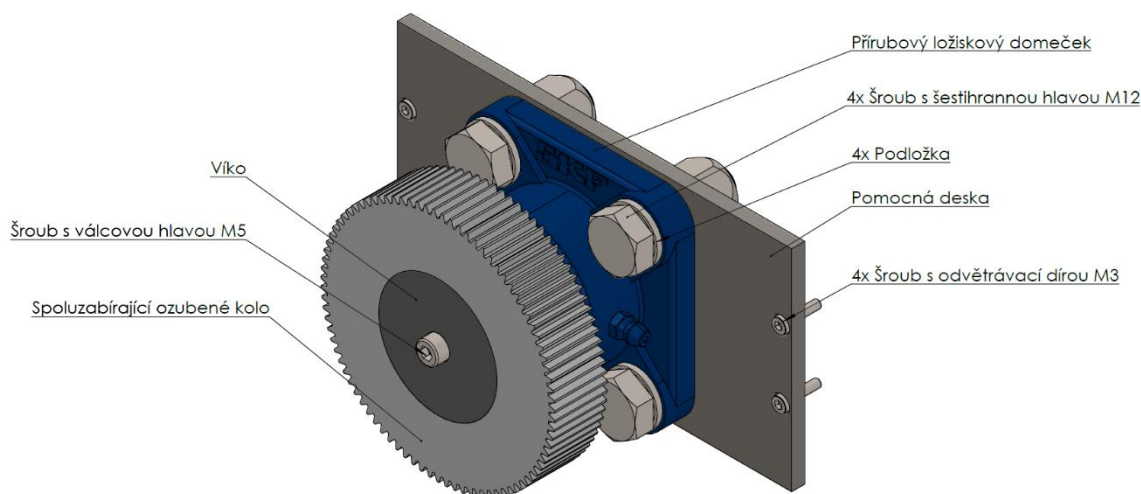
### 5.1.4 Spoluzabírající ozubené kolo

Mnoho vlastností spoluzabírajícího kola se odvíjí od pastorku, ale i od pohonné soustavy. Opět nejpodstatnějšími vlastnostmi jsou zejména rozměry a materiál. Na obrázku (Obr. 5-7) je vyobrazeno kolo s průměrem patní kružnice 89 mm, což odpovídá 87 zubům. Tento průměr je zásadně ovlivněn velikostí pastorku. Pokud bychom zvolili, že největší možný pastorek s průměrem patní kružnice odpovídá již zmíněným 60 mm, pak maximální průměr patní kružnice spoluzabírajícího kola může být až 150 mm. Flexibilita při výběru velikosti obou ozubených kol je dosažena pomocí lineárního vedení, které bude popsáno níže. Šířka spoluzabírajícího kola se taktéž odvíjí od pastorku, tudíž v tomto případě je zvolena hodnota 20 mm. Modul ozubeného kola je zvolen jako 1 mm a je zde využito přímého ozubení. Materiál kola je vybrán obdobně jako u pastorku, tedy polymerní materiál třídy PEEK.



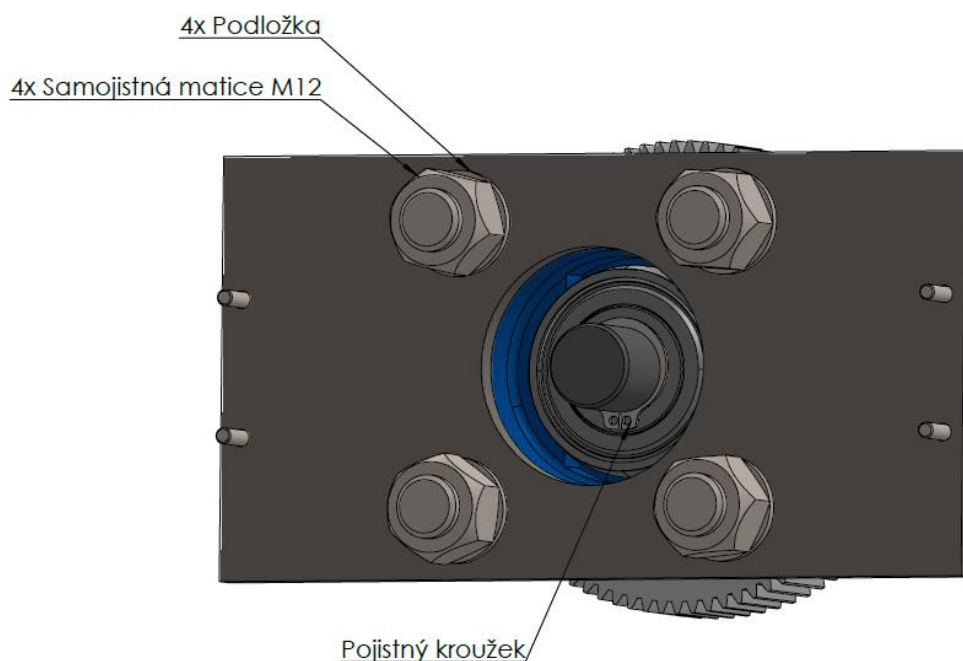
Obr. 5-7 Schematické zobrazení uložení spoluzabírajícího kola

Ozubené kolo je uloženo na hřídel o průměru 16 mm. Pro přenesení točivého momentu je využito spojení pomocí těsného pera. Přenos pomocí pera byl zvolen vzhledem k jednoduchosti a nízké ceně. Spoluzabírající kolo je na hřídeli axiálně zajištěno obdobně jako u pastorku, a to pomocí víka a šroubu s válcovou hlavou. V tomto případě musí být využito šroubu s vyvrtanou odvětrávací dírou.



Obr. 5-8 Schematický popis podsestavy spoluzabírajícího kola (pohled zepředu)

Na obrázku (Obr. 5-8) lze vidět umístění hřídele včetně náboje do ložiskového domečku od firmy SKF. Byl vybrán nejmenší ložiskový domeček s přírubou a s označením F4B 012-RM. Tento díl byl vybrán vzhledem k jeho malým rozměrům a jedná se o nejmenší ložiskový domeček, který firma SKF nabízí. Společně s tímto dílem firma nabízí kuličkové ložisko YAT 204-012. Toto ložisko lze použít, pokud bude využito maziva vhodného pro aplikace ve vakuu. Ložisko má následující parametry: základní dynamická únosnost = 12,7kN; základní statická únosnost = 6,55kN. Celé uložení je připevněno pomocí 4 šestihranných šroubů k pomocné desce, která je následně umístěna na lineární vedení.

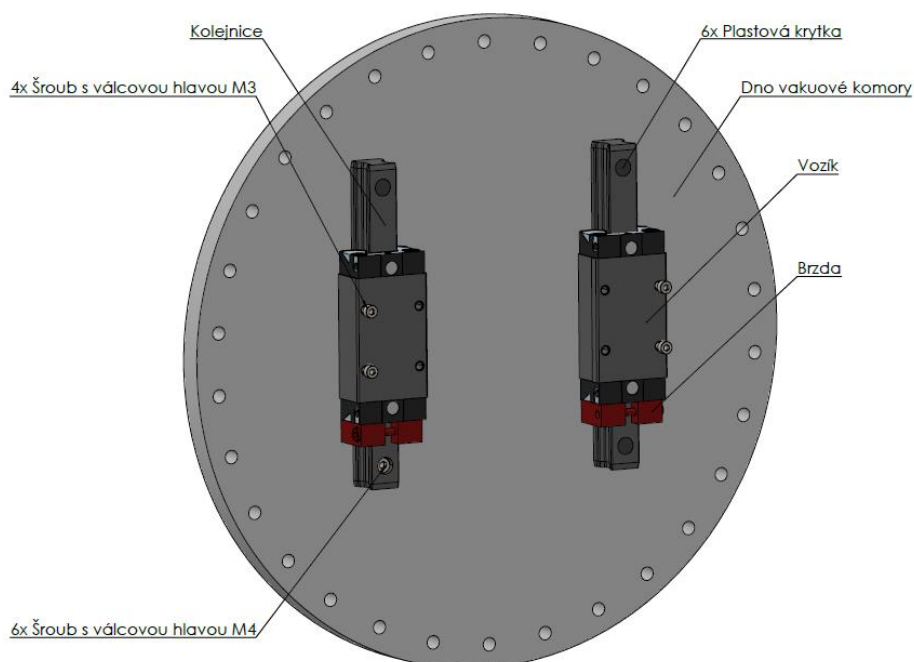


Obr. 5-9 Schematický popis podsestavy spoluzabírajícího kola (pohled zezadu)

Z obrázků (Obr. 5-7 a 5-9) lze poznat, že axiálního zajištění hřídele je dosaženo pomocí pojistného kroužku umístěného ze zadní strany domečku. Zároveň lze polohu hřídele zajistit již z výroby připraveným malým stavěcím šroubem.

### 5.1.5 Lineární vedení

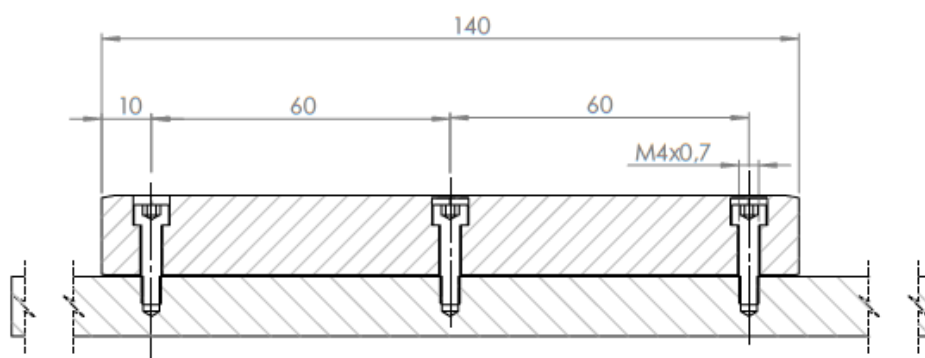
Jak již bylo výše zmíněno, celá podsestava spoluzabírajícího kola je připevněna pomocí 4 šroubů k lineárnímu vedení. Pro tento šroubový spoj musí být opět využito šroubů s odvětrávací dírou o velikosti M3, jelikož díra ve vozíku je neprůchodná a mohla by se zde vytvořit vzduchová kapsa. Toto lineární vedení hraje velmi podstatnou roli v tomto koncepčním návrhu, protože díky němu jsme schopni měnit osovou vzdálenost ozubeného soukolí.



Obr. 5-10 Schématický popis podsestavy lineárního vedení

Možnost měnit osovou vzdálenost přináší mnoho nových faktorů, pomocí kterých lze různě modifikovat testovací zařízení. Díky této změně lze zejména měnit rozměry a druh ozubených kol. Jsme schopni měnit jak typ ozubení, tak i velikost modulů a tím maximálně využít potenciál dostupné vakuové komory. Zároveň díky lineárnímu vedení lze nadále navázat na tuto práci dalším testováním polymerního ozubení, a to například testováním boční vůle – backlash, jelikož tato vůle závisí právě na velikosti osové vzdálenosti.

Volba dodavatele a druhu lineárního vedení závisí zejména na dostupnosti a výšce pořizovacích nákladů. V tomto případě bylo vybráno kuličkové lineární vedení od firmy Bosch Rexroth AG. Byl zde zvolen standartní typ ocelové kolejnice s krytovanými dírami pro šrouby. Délka kolejnice odpovídá 140 mm společně s šířkou 15 mm. K rozměrům kolejnice musel být vybrán i odpovídající vozík. Vzhledem k malému prostoru byl zvolen vozík od stejnojmenné firmy typu Slimline, přesněji tedy vozík pro kuličkové vedení řady SLS. K ustavení vozíku do požadované polohy je využito brzdy umístěné na každé z kolejnic. Přesné vymezení polohy lze provést mimo vakuovou komoru, a to například elektronickým mikrometrem.



Obr. 5-11 Schematické zobrazení uložení kolejnice

Na obrázku (Obr. 5-11) lze vidět uložení kolejnicového vedení do dna vakuové komory. Byla zde zvolena kolejnice s 3 dírami. Pro spojení kolejnice s dnem je využito 3 šroubů s válcovou hlavou na každé ze dvou kolejnic. Všech 6 šroubů musí obsahovat vnitřní odvětrávací díru. Dalším možným řešením by bylo využití kolejnice bez děr, přičemž by se obě kolejnice přivařily k desce vakuové komory. Toto řešení by však znemožňovalo demontování, a proto byla zvolena kolejnice s dírami pro šrouby.

### 5.1.6 Cenový odhad

Na základě modelu finálního koncepčního řešení byl vypracován cenový odhad testovacího zařízení. Hřídel, pomocná deska pro ložisko, pomocné dno a obě víka bylo nutné poptat pro zjištění přesnějšího odhadu. Ceny jsou orientační, jelikož záleží na zvoleném materiálu, vybraném dodavateli a výrobcí. Ceny jsou aktuální ke dni 16.5.2022 a mohou se měnit vzhledem k dění ve světě. Celková odhadovaná cena všech komponentů zařízení odpovídá 43 277,20 Kč. Jednotlivé ceny součástí lze nalézt v příloze (Příloha 1).

## 6 DISKUZE

Koncepční návrhy odrážejí informace získané v rešeršní části této práce, a to zejména v použití materiálů a typu pohonu. Současně veřejně dostupná testovací zařízení jsou však rozměrově velká, a tudíž muselo být vymyšleno kompaktnější řešení, které by splňovalo svou funkci v dostupné vakuové komoře.

První koncepční návrh vnáší nové řešení, které se opírá o rotační průchodku uloženou v jedné z podstav vakuového hrnce. Již z názvu tohoto dílu je patrné, že průchodka umožňuje průchod dovnitř vakuové komory rotačního dílu sestavy, tedy v tomto případě hřídele. Testovací zařízení je navrženo tak, aby zde mohlo být využito motorů, převodovek a jiných komponentů bez nutnosti schopnosti pracovat ve vakuu. Tato varianta má pak značně nižší pořizovací náklady jednotlivých komponentů. Tento návrh však nebyl vybrán jako finální řešení, a to paradoxně kvůli již zmíněné rotační průchodce. Průchodka zásadně ovlivňuje konstrukci samotné komory a tím může docházet k netěsnostem. Zároveň tak samotná průchodka není dokonale těsná. Z tohoto důvodu by musel být regulován tlak uvnitř komory a taktéž by mohlo být ovlivněno testování ozubení. Nadále průchodka i značně ovlivňuje rozměry hřídele, velikost otáček a točivého momentu, který je schopna převést.

Na základě zmíněných nedostatků prvního konceptu byl zhotoven druhý, který tyto problémy eliminuje. Druhý a zároveň finální koncept byl navržen tak, aby splnil veškeré nutné podmínky. Byla zde vybrána pohonná soustava, která je schopna odolat podmínkám vakua. Tento typ krokového motoru a harmonické převodovky byl vybrán po konzultaci s firmou Phytron, která se zabývá výrobou pohonných soustav v extrémních podmínkách. Zároveň je ale celá soustava schopna pracovat i ve velmi vysokých teplotách, jelikož použité materiály jsou schopny krátkodobě vystát i teploty atakující 300 °C. [14] Pořizovací náklady této pohonné soustavy jsou sice vyšší, lze ji však využít i v možném navazujícím experimentu, který by nezanedbával termální vlivy okolí. V tomto návrhu bylo využito celého prostoru vakuové komory, přičemž na dno vakuového hrnce bylo umístěno lineární vedení, které vnáší do testování nové možnosti. Zejména je díky tomuto řešení možné měnit osovou vzdálenost a tím i využít různé typy a rozměry ozubených kol. Současně testovací zařízení vyniká jednoduchostí konstrukce a lehkostí změny použitých ozubených kol mezi měřeními. Ve finálním řešení byl zvolen polymerní materiál třídy PEEK, který splňuje maximální hodnoty odpařování povolené Evropskou vesmírnou agenturou. Vzhledem k flexibilitě výsledného testeru lze však materiály různě měnit a kombinovat. Například zvolit pastorek z polymerního materiálu a spoluzabírající kolo ku příkladu z oceli. Testovací zařízení má za úkol měřit tření mezi jednotlivými zuby v záběru, což je umožněno pomocí tenzometrických snímačů. Díky změně osové vzdálenosti by ale testovací zařízení mohlo být využito například i k měření boční vůle. Nevýhodou finálního testovacího zařízení je vyšší pořizovací cena, jelikož musí být všechny komponenty schopny pracovat ve vakuu.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vypracování koncepčního řešení testeru polymerního ozubení ve vakuu. Tento koncept byl vypracován na základě rešerše, která poukázala na velmi malé množství veřejně dostupných testovacích zařízení. Finální koncepční návrh vnáší do této problematiky nové možné řešení. Na rešeršní část práce navazuje tvorba dvou koncepčních návrhů. Oba koncepční návrhy splňovaly jeden z dílčích cílů, který vznikl v průběhu vypracovávání této práce nad rámec původního zadání. Tímto dílčím cílem bylo umožnit umístění finálního testovacího zařízení dovnitř dostupné vakuové komory. Prvním možným řešením bylo umístění pohonné soustavy mimo vakuovou komoru, čímž bylo umožněno využití široké škály motorů i převodovek různých rozměrů. Druhé a zároveň finální testovací zařízení je celé umístěno dovnitř vakuové komory. Zvolený koncepční návrh je nadále podrobně popsán a realizován jako 3D model v softwaru Solidworks. Na tuto práci by mohlo navazovat rozšířené testování polymerního ozubení, které by zahrnovalo i působení termálních vlivů.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Termální analýza malé družice moderní koncepce* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63587/F2-DP-2016-Forman-Lukas-DP\\_FORMAN\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63587/F2-DP-2016-Forman-Lukas-DP_FORMAN_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce.
- [2] *Thermal analysis and control of small satellites in low Earth orbit* [online]. 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=8755&context=masters\\_theses](https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=8755&context=masters_theses). Masters Thesis.
- [3] *Space environment effects on polymers in low earth orbit* [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)00640-2](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00640-2)
- [4] CHIGGIATO, Paolo. *Outgassing* [online]. In: . 2006 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://cas.web.cern.ch/sites/default/files/lectures/platjadaro-2006/chiggiato-1.pdf>
- [5] *Application of Synthetic Gear Wheels to Space Mechanisms* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119047](https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119047)
- [6] *VICTREX 450G PEEK* [online]. In: . [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.victrex.com/en/news/2016/12/new-rampart-robust-connector>
- [7] *Evaluation and test of different gear concepts for Ka-band Antenna Pointing Mechanisms* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.1109/AERO.2014.6836213](https://dx.doi.org/10.1109/AERO.2014.6836213)
- [8] *DuPont™ Vespel® SP-3* [online]. In: . [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Vespel-SP-3-Data-Sheet>
- [9] *VLK, Miloš, et al. Experimentální mechanika. Brno: VUT (Fakulta strojního inženýrství), 2003.* [online]. In: . [cit. 2022-02-28].
- [10] *Fundamentals of Finite Element Analysis* [online]. [cit. 2022-02-28]. ISBN 0071122311. Dostupné z: [https://wp.kntu.ac.ir/fz\\_kalantary/Source/Finite%20element%20method/Books-Numerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20\(2004\).pdf](https://wp.kntu.ac.ir/fz_kalantary/Source/Finite%20element%20method/Books-Numerical/Fundamentals%20of%20Finite%20Element%20Analysis,%20Hutton%20(2004).pdf)

- [11 *A novel estimation method of friction coefficient for evaluating gear pitting fault* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105715](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105715)
- [12 *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: [https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/74082/ICES\\_2018\\_81.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/74082/ICES_2018_81.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13 *Harmonic Drive®* [online]. In: . [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology/harmonicdrive>
- [14 *Phytron GmbH* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.phytron.eu/fileadmin/user\\_upload/produkte/motoren\\_aktuatoren/pdf/ds-vacuum-en.pdf](https://www.phytron.eu/fileadmin/user_upload/produkte/motoren_aktuatoren/pdf/ds-vacuum-en.pdf)
- [15 *6 Advanced Methodologies for Gear Test Rig* [online]. In: . [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/6-advanced-methodologies-for-gear-test-rig-part-1/>
- [16 *Gearbox Mechanical Efficiency Determination by Strain Gauges Direct Application* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.3390/app112311150](https://doi.org/10.3390/app112311150)
- [17 *COMSOL Multiphysics* [online]. In: . [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.humusoft.sk/blog/20210217-comsol-multiphysics-v-peti-odstavcich/>
- [18 *PICASSO CubeSat* [online]. In: . [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2015/01/PICASSO\\_CubeSat2](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/01/PICASSO_CubeSat2)
- [19 *Strain Wave Gear Principle* [online]. In: . [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology/harmonicdrive>
- [20 *Vacuum-Compatible Screws* [online]. In: . [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=7956](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7956)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

CNC	Computer Numerical Control
MKP	Metoda konečných prvků
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PEEK	Poly-ether-ether-keton
PTFE	Polytetrafluorethylen
SLS	Selective Laser Sintering, metoda 3D tisku
TML	Total mass loss
$\alpha$	Součinitel teplotní délkové roztažnosti

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Satelit PICASSO CubeSat [18].....	14
Obr. 2-2 Tenzometrické snímače umístěny na tělo ozubeného kola a patu zubu [15] .....	18
Obr. 2-3 Foliový tenzometrický snímač přilepený na hřídel s účelem měření kroutícího momentu [16].....	19
Obr. 2-4 Hybridní síť metody konečných prvků [17] .....	20
Obr. 2-5 Příklad využití MKP v programu MATLAB pro výpočet vedení tepla .....	20
Obr. 2-6 Termovakuová komora.....	21
Obr. 2-7 Testovací zařízení .....	23
Obr. 2-8 Testovací zařízení .....	25
Obr. 2-9 Pozice tenzometru a důlku na ozubeném kole .....	26
Obr. 2-10 Porovnání součinitele tření u nepoškozeného ozubeného kola (normal) a u kola se značným poškozením .....	27
Obr. 3-1 Schematický model vakuové komory .....	29
Obr. 3-2 Schéma chodu harmonické převodovky [19].....	30
Obr. 4-1 Schematické zobrazení koncepčního návrhu č. 1 (pohled shora).....	32
Obr. 4-2 Schematické zobrazení koncepčního návrhu č. 2 .....	33
Obr. 5-1 Render finálního testovacího zařízení.....	35
Obr. 5-2 Schematický popis pohonné soustavy (pohled zepředu) .....	36
Obr. 5-3 Schematický popis pohonné soustavy (pohled zezadu).....	37
Obr. 5-4 Schéma šroubu s odvětrávací dírou [20] .....	38
Obr. 5-5 Schematické zobrazení uložení pastorku.....	39
Obr. 5-6 Tvarový prvek na hřídeli (sražení na plochu) .....	39
Obr. 5-7 Schematické zobrazení uložení spoluzabírajícího kola .....	40
Obr. 5-8 Schematický popis podsestavy spoluzabírajícího kola (pohled zepředu).....	41
Obr. 5-9 Schematický popis podsestavy spoluzabírajícího kola (pohled zezadu) .....	41
Obr. 5-10 Schématický popis podsestavy lineárního vedení.....	42
Obr. 5-11 Schematické zobrazení uložení kolejnice .....	43

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Teplotní rozhraní vybraných částí satelitu .....	15
Tab. 2-2 Materiálové charakteristiky Victrex PEEK 450G [6] .....	17
Tab. 2-3 Materiálové charakteristiky Vespel SP-3 [8] .....	17
Tab. 2-4 Parametry použitého pastorku.....	22
Tab. 2-5 Požadavky zařízení pro provedení testu .....	22
Tab. 2-6 Parametry hnacího kola.....	24

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

### 12.1 Cenový odhad

Příloha 1. Cenový odhad finálního testovacího zařízení